

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике

Секция механики Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов  
управления Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Уральское отделение  
Российской академии наук

Научный центр мирового уровня «Сверхзвук»

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии  
наук» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения  
Российской академии наук

# **XXIV Зимняя школа по механике сплошных сред**

**Тезисы докладов**

**24-28 февраля 2025 г.**

**Пермь, 2025**

УДК [539.3+532.5](063)

XXIV Зимняя школа по механике сплошных сред Пермь, 24 – 28 февраля 2025г.  
Тезисы докладов. – Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2025г. – 339 с.  
ISBN

Представлены тезисы докладов XXIV Зимней школы по механике сплошных сред, проводимой «Институтом механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиалом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук в период с 24 по 28 февраля 2025 г.

Сборник отражает тематику Школы и содержит результаты исследований по актуальным проблемам вычислительной механики сплошных сред, физике и механике мезо- и наноструктурных систем, механике функциональных материалов, конвекции, гидродинамической устойчивости и турбулентности, гидродинамике неньютоновских жидкостей и жидкостей с особыми свойствами, фундаментальной и прикладной магнитной гидродинамике, механике сплошных сред в биологии и медицине, горной механике, мониторингу природных и техногенных систем.

Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны научным работникам, а также студентам и аспирантам, специализирующимся в области механики сплошных сред.

Издается в авторской редакции.

ISBN

XXIV Зимняя школа проводится в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329).

*Издается по решению Ученого совета «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук*

Ответственный за выпуск: Н.А. Юрлова

© ИМСС УрО РАН, 2025 г.

© Авторы, 2025 г.

## Содержание

<b>Тезисы пленарных докладов</b>	21
Васильев О.В. Комплексные адаптивные технологии многомасштабного моделирования задач механики жидкости и газа: перспективы и возможности	22
Георгиевский Д.В. Динамическое деформирование тонких идеально жёсткопластических тел	23
Губайдуллин Д.А. Особенности волновой динамики и акустики многофазных, многокомпонентных сред	24
Ерманюк Е.В. Энергетические характеристики аттракторов внутренних и инерционных волн	25
Иванов А.О. Ориентационное структурирование суперпарамагнитных наночастиц в феррожидкостях/феррокомпозитах в магнитном поле	26
Исаев С.А. Гидродинамические механизмы вихревой интенсификации тепломассообмена на энергоэффективных структурированных поверхностях	27
Козлов В.Г. Особенности осредненной вибрационной динамики неоднородных систем во вращающихся полостях	29
Корсунский А.М., Равикович Ю.А., Рипецкий А.В., Назаров Е.В., Холобцев Д.П., Иванов Н.С., Чумаевский А.В., Колубаев Е.А., Плехов О.А., Статник Е.С., Салимон А.И. РЭК: Расчетно-экспериментальная корреляция для обеспечения надежности механических свойств и служебных характеристик авиационных материалов и конструкций	30
Кривилев М.Д. Решение сопряженных задач тепломассопереноса и деформирования при 3Д-печати металлом	31
Кривцов А.М. Использование подходов, основанных на уравнениях кинетики газовой динамики Бернулли-Эйлера и Шрёдингера, для описания процессов переноса	32
Мулюков Р.Р. Наноструктуры в жидкости, твердом теле и живой природе	33
Наймарк О.Б. Критическая динамика процессов деформирования и разрушения конденсированных сред в широком диапазоне интенсивностей нагружения	34
Петров Ю.В. «Парадоксы» динамики и разрушение твердых тел	35
Полянский В.А., Беляев А.К., Седова Ю.С., Яковлев Ю.А., Полянский А.М., Нечаева А.В. Обратная связь при разрушении металлов	36
Прууэл Э.Р., Студенников А.А., Рубцов И.А. Статус изготовления экспериментальной станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ»	37
Фрейдин А.Б. Связанные задачи хемомеханики: постановки и решения	38
Фрик П.Г. Особенности глобальной циркуляции атмосферы модельных планет земного типа	39
Шутов А.В., Вардосанидзе О.Д. Концепция представительных направлений для геометрически нелинейного моделирования деформирования твёрдых тел	40

<b>Тезисы докладов</b>	41
Адамов А.А. Инженерная оценка напряженного состояния сферического антифрикционного полимерного слоя в опорной части с шаровым сегментом ..	42
Адамов А.А., Келлер И.Э., Кузьминых В.С., Иванов Я.Н., Утев Н.В. Определение вязкоупругих и трибологических свойств высоконаполненной резины .....	43
Айзикович С.М., Волков С.С., Васильев А.С., Лапина П.А. Приближенное решение контактных задач для неоднородного слоя .....	44
Алабужев А.А., Пьянкова М.А. Динамика капли в переменном электрическом поле с учетом насыщения краевого угла .....	45
Алабужев А.А. Вынужденные колебания газового пузырька с гистерезисом краевого угла .....	46
Амбаров А.В., Елфимова Е.А., Зверев В.С. Специфика динамической восприимчивости ансамбля взаимодействующих обездвиженных дипольных частиц в постоянном и переменном магнитных полях.....	47
Андрюкова В.Ю., Тарасов В.Н. Устойчивость фигур Рёло под действием нормальной нагрузки .....	48
Анисимов Г.С., Степанова Л.В. Восстановление картин полос, получаемых поляризационно-оптическими методами в механике разрушения: технологии искусственного интеллекта .....	49
Антонова О.В., Ровой Э., Охотников А.О., Иванов С.Д., Кабин Н.А. Применение гиперупругих моделей материала для описания механического поведения высокотехнологичных медицинских изделий и биологических тканей .....	50
Артамонова Н.Б., Шешенин С.В., Чистяков П.В. Экспериментальное исследование свойств песков в условиях сжатия и сдвига .....	51
Балабаев Н.Е., Лучинкин Н.А., Беляев И.А. Экспериментальное исследование влияния электрической проводимости стенки на образование магнитно-конвективных пульсаций потока в вертикальных каналах .....	52
Банникова И.А., Уваров С.В., Банников М.В. Механические свойства и анализ фрагментации песчаника в условиях квазистатического нагружения .....	53
Барулина М.А., Тимкина Т.Д., Иванов Я.Н., Масляков В.В., Полиданов М.А., Волков К.А. Математическая модель напряженно-деформированного состояния наполненного мочевого пузыря человека .....	54
Баяндин Ю.В. Аналитическое решение уравнения быстрой диффузии .....	55
Беляев А.К., Полянский В.А., Седова Ю.С., Дегилевич Е.А. Модели движения водорода в экструдере при низких температурах .....	56
Беляев А.Ю., Свистков А.Л. Потеря устойчивости тонкого приповерхностного слоя вследствие напряжений, вызванных наличием распределенного электрического заряда.....	57
Беляев Ф.С., Горбаченко Д.Ф., Евард М.Е., Волков А.Е. Исследование влияния температур рабочего цикла на работоспособность термомеханического привода с силовым элементом из сплава никелида титана .....	58

Беляева А.В., Сухановский А.Н. Моделирование процессов теплообмена в условиях городской геометрии .....	59
Беляева Т.Д., Новак Е.В. Исследование самодиффузии активных магнитных эллипсоидальных частиц .....	60
Биллер А.М., Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Колебания частиц в магнитоактивном эластомере, индуцированные переменным полем: влияние магнитомеханического гистерезиса .....	61
Богданова А.П., Каменских А.А., Носов Ю.О. Анализ вязкоупругого поведения антифрикционных полимерных и композиционных материалов .....	62
Богданова А.П., Каменских А.А., Носов Ю.О. Математическое моделирование представительного объема сферической опорной части мостового сооружения с учетом вязкоупругих и вязкоупругопластических характеристик материалов ...	63
Богданова Н.А., Жилин С.Г., Предеин В.В., Фирсов С.В. Формирование пористых выплавляемых моделей тел вращения в поле действия центробежных сил .....	64
Боженко С.А., Туркин С.Д., Закинян А.Р. Поглощение микроволнового излучения магнитодиэлектрическими эмульсиями .....	65
Бондаренко А.А., Колесниченко И.В. Исследование осесимметричного течения жидкого металла в Т-образной цилиндрической ячейке под действием азимутальной силы .....	66
Бондаренко А.А., Колесниченко И.В. Влияние формы П-образных элементов конструкции центробежного кондукционного насоса на момент электромагнитных сил .....	67
Борзенко Е.И., Гарбузов Д.Н., Ефремов М.А. Моделирование процесса диспергирования частиц по объему жидкости в смесительном аппарате .....	68
Бочкарёв С.А. Собственные колебания усечённых конических оболочек переменной толщины с жидкостью .....	69
Бочкарёв С.А., Сенин А.Н. Численное моделирование гидроупругого взаимодействия частично заполненной жидкостью горизонтальной оболочки в поле силы тяжести .....	70
Брацун Д.А., Краснякова Е.А., Мизев А.И., Сираев Р.Р. Динамика микрореактора со смесителем Марангони .....	71
Брюханов И.А., Фомин Е.В., Утешев А.В. Исследование скоростного упрочнения металлов и сплавов методом молекулярной динамики и в экспериментах .....	72
Бублик С.А., Семин М.А., Левин Л.Ю. Исследование закономерностей морозного пучения в искусственно замораживаемых засоленных грунтах .....	73
Вассерман И.Н. Численное моделирование статических бидоменных эффектов в сердечной ткани .....	74
Веденеев В.В., Гареев Л.Р., Зайко Ю.С., Трифонов В.В., Экстер Н.М. Абсолютная и глобальная неустойчивость затопленных струй .....	75
Вережак М.В., Плехов О.А., Жеребцов С.В. Влияние лазерной ударной обработки на эволюцию текстуры титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 .....	76
Ветров А.Л., Быков А.В., Калинин Н.А., Фрик П.Г., Сухановский А.Н.,	77

Степанов Р.А. Моделирование общей циркуляции атмосферы Земли и идеализированных планет земного типа с использованием WRF-ARW .....	
Виндокуров И.В., Еленская Н.В., Ташкинов М.А. Экспериментальное исследование влияния процессов деградации на механическое поведение аддитивно изготовленных образцов полилактида .....	78
Витохин Е.Ю., Волынская М.А., Новицкий Д.В. Определение динамических характеристик массивных бетонных сооружений с помощью метода декомпозиции в частотной области .....	79
Витохин Е.Ю., Костылев В.С., Скворцова А.Е., Хазиахметов Т.Р. Применение комплексного подхода при создании конечно-элементной модели Саяно-Шушенской ГЭС совместно со скальным основанием .....	80
Волков Г.А., Казаринов Н.А., Лукашов Р.В., Логачев А.Н., Петров Ю.В. Скоростная чувствительность переходных процессов в сплошных средах .....	81
Володин И.В., Алабужев А.А. Моделирование процесса переноса концентрации в двухслойном канале методом решеточных уравнений Больцмана .....	82
Володин И.В., Алабужев А.А. Осредненная динамика длинноволновой конвекции Марангони в тонкой пленке под действием вертикальных вибраций .....	83
Ворошилов Е.С., Груздь С.А., Кривилев М.Д. Моделирование консолидации при лазерном сплавлении металлических порошков .....	84
Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Плехов О.А. Эволюция температуры вблизи вершины усталостной трещины после лазерного ударного упрочнения .....	85
Вшивкова А.А., Швейкин А.И. Многоуровневое моделирование сложного нагружения металлов при изменяющихся температуре и скорости деформации .....	86
Вяткин Я.В., Трусов П.В. Прямая упруговязкопластическая модель: оценка влияния свободной поверхности на свойства миниатюрных моно- и поликристаллических образцов .....	87
Гайфутдинов Р.А., Паршин Д.В. Гидродинамический стенд для моделирования нестационарного течения в моделях сосудов и сосудистых патологий .....	88
Гаришин О.К., Свистков А.Л., Шадрин В.В., Возняковский А.П., Неверовская А.Ю. Исследование вязкоупругого поведения эластомерных нанокмозитов в зависимости от типа наполнителя (1D, 2D, 3D частицы) .....	89
Гачегова Е.А. Лазерная ударная проковка с использованием различных материалов защитного покрытия .....	90
Герцен Т.А., Любимова Н.Ю., Любимова А.А. Исследование колебаний тонких пленок на контуре .....	91
Гладких П.А., Трусов П.В. Итерационный подход для исключения неопределенностей в моделях Тейлора-Бишопа-Хилла .....	92
Голдобин Д.С. Динамика сверхактивных броуновских частиц в осесимметричных потенциалах .....	93
Гольцов Е.С., Труфанова Н.М. Математическая модель процессов тепломассопереноса при промывке нефтяной скважины через полые штанги ...	94
Горбаченко Д.Ф., Беляев Ф.С., Евард М.Е., Волков А.Е. Влияние эффекта стабилизации мартенсита на работоспособность привода с рабочим элементом из сплава с памятью формы .....	95

Гордеева А.И., Нурмухаметов Д.И., Пономарёв Р.С. Оптоволоконный амплитудный датчик электромагнитных полей на основе жидкого кристалла 5СВ .....	96
Грохотова Е.В., Соловьева А.Ю., Елфимова Е.А. Определение энергетически выгодного расположения многогранульной частицы в статическом магнитном поле .....	97
Груздь С.А., Шутов И.В., Салтыков И.Р. Исследование влияния оксидного слоя на растекание цинкового припоя по поверхности алюминиевой пластины с учетом диффузионных процессов .....	98
Гурджиев А.В., Третьяков М.П. Исследование ультразвуковыми методами контроля характера повреждений при комбинированном нагружении полимерных композиционных материалов .....	99
Гусев Г.Н., Горбач С.К. Деформационный мониторинг подземных магистральных трубопроводов на подрабатываемых территориях .....	100
Гусев Г.Н., Корепанов В.В. Методика оценки деформированного состояния армокаменных сооружений на подрабатываемых территориях .....	101
Далинкевич А.А., Фомин Л.В. Структурно-кинетическая модель изменения механических свойств ориентированных полимеров при радиационно-окислительном старении .....	102
Демин В.А., Демин Ф.В. Динамика фронта пара под левитирующей каплей ...	103
Демин В.А., Демина Т.В. Трехмерное численное моделирование распространения паров кремния в разряженной среде инертного газа .....	104
Денисова М.О, Костарев К.Г. Горохова С.В. Диффузия ПАВ в неравновесной системе несмешивающихся жидкостей в условиях максимального подавления гравитационной конвекции .....	105
Денисова М.О, Костарев К.Г. Развитие реакции нейтрализации в капле, поглощающей ПАВ из его однородного раствора .....	106
Денисюк Е.Я. Упругие и термодинамические свойства полимерных гелей .....	107
Дмитрачкова А.П., Пантелеев С.А., Зарипов Д.И. Бессеточный метод интерполяции двумерных векторных полей скорости .....	108
Добросердова А.Б., Канторович С.С. Динамический магнитный отклик модели магнитных эластомеров с учетом внутренней анизотропии частиц .....	109
Долгих Д.А., Ташкинов М.А. Анализ влияния армирующего волокна на процесс многомасштабного накопления повреждений в 3D-печатных полимерных конструкциях .....	110
Дудин Д.С., Келлер И.Э. Описание сульфидно-оксидной коррозии жаропрочного сплава нелинейной моделью хемомеханики .....	111
Дьякова В.В., Власова О.А., Козлов В.Г. Устойчивость осциллирующей границы раздела жидкостей в вертикальном щелевом канале, осредненные течения и массоперенос через границу .....	112
Егорова А.А., Самойлова А.Е. Конвективный перенос в донных отложениях при неоднородности геотермического градиента .....	113
Еленская Н.В., Ташкинов М.А., Виндокуров И.В. Влияние типа функционального градиента на механический отклик структур на основе	114

трижды периодических минимальных поверхностей .....	
Елфимова Е.А., Грохотова Е.В., Соловьева А.Ю., Иванов А.О. Статическое намагничивание обездвиженных многогранульных частиц и их ансамблей .....	115
Ельищев В.А., Лосев Г.Л. Форма свободной поверхности вращающейся жидкости в цилиндрической полости .....	116
Епин В.В., Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Многолетний мониторинг деформированного состояния строительных объектов, находящихся на подработанных территориях .....	117
Ерофеев В.И., Бутыгин Д.А. Нелинейная продольная волна, распространяющаяся в стержне, деформирование материала которого описывается неогуковским потенциалом .....	118
Ершов А.Д., Кузькин В.А. N-ступенчатый переход между двумя одномерными кристаллами .....	119
Еськова И.В., Ерин К.В. Определение электропроводности магнитных коллоидов на основе жидких диэлектриков оптическими методами .....	120
Ефремов Д.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Гидро- и сонолюминесценция как способ исследования микровзрывного распыления топлива .....	121
Зайцев А.В., Заболотных А.А., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Закономерности деформирования и проницаемости карбонатных пород при трехосном непропорциональном нагружении .....	122
Зайцев А.В., Мельников Д.Л. Эффективные деформационные постоянные остеона и компактной костной ткани человека .....	123
Зайцев А.В., Мильхин В.А., Мельников Д.Л., Судаков И.А., Шобей М.М. Фурье- и вейвлет-анализ сигналов виброускорения для определения дефектов роликовых подшипников качения .....	124
Закинян А.Р., Кононенко Д.В. Деформация и взаимодействие капель феррожидкости в магнитном поле .....	125
Закинян А.Р., Орехова С.М. Гидродинамические неустойчивости в феррожидкостях в магнитном и электрическом поле .....	126
Зверев В.С., Кузнецов А.А., Канторович С.С. Компьютерное моделирование динамической восприимчивости эллипсоидальных многоядерных частиц .....	127
Зубарев А.Ю., Исакова Л.Ю. Магнитная гипертермия в системах взаимодействующих ферромагнитных наночастиц .....	128
Зубарев А.Ю., Степанов Г.В. Гистерезис одноосной деформации магнитных эластомеров во внешнем поле .....	129
Иванов А.О., Соловьева А.Ю., Елфимова Е.А. Формирование цепочечных агрегатов в суспензии суперпарамагнитных наночастиц .....	130
Иванов А.С., Косков М.А., Крыласова О.С. Конфигурация магнитного поля вблизи магнитожидкостной опоры, состоящей из постоянных магнитов .....	131
Иванов А.С., Косков М.А., Сомов С.А. Гидродинамические аспекты создания макета магнитожидкостного инерционного датчика.....	132
Иванов М.В., Михайлов А.А., Антонова О.В., Кузьмин В.А. Оптимизация несущей способности металлических панелей с тетраэдральным наполнителем .....	133



Иванов С.Ю., Степанов Н.Д., Жеребцов С.В. Влияние параметров процесса многократной лазерной ударной обработки на характер деформирования пластин из сплавов различного класса .....	134
Иванов Я.Н., Кондюрин А.В., Пестренин В.М., Пестренина И.В. Оценка НДС крупногабаритной композитной оболочки в процессе ее отверждения в условиях космоса.....	135
Изюмова А.Ю., Бартоломей М.Л., Вшивков А.Н., Плехов О.А Особенности формирования поля остаточных напряжений при лазерной ударной обработке цилиндрической поверхности .....	136
Ильиных А.В., Вильдеман В.Э. Прогнозирование циклической долговечности аддитивного титанового сплава ВТ6 в условиях концентрации напряжений ....	137
Ильиных Г.В., Сметанников О.Ю., Фасхутдинова Ю.Б. Численное моделирование создания индивидуальных ортезов из термоусаживаемых трубок .....	138
Казанцев П.Н., Смородин Б.Л. Конвективная устойчивость стратифицированной магнитной жидкости в модулированном магнитном поле	139
Казаринов Н.А., Волков Г.А., Петров Ю.В. Дискретные подходы к эффектам динамического разрушения. Инерция процесса динамического разрушения .....	140
Калюжная Д.А., Соколов Е.А., Ряполов П.А. Влияние магнитного поля на динамику капель магнитной жидкости .....	141
Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П. Численный анализ собственных частот колебаний пологих оболочек, находящихся под действием температурной нагрузки .....	142
Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Сенин А.Н. Колебания электроупругих пластин и оболочек, находящихся под действием статической нагрузки .....	143
Каракчеева М.И., Краснякова Е.А. Перемешивание в микроканалах проточного типа в условиях неустойчивой стратификации жидкостей .....	144
Кирпичев В.А., Устюгов М.Д., Любимова Т.П. Численное исследование движения жидкой капли в пористой среде, насыщенной другой жидкостью.....	145
Клименко Л.С., Марышев Б.С. Транспорт активных наночастиц через микроканал во внешнем потоке .....	146
Клиорин Н., Степанов Р.А., Кузанын К.М., Васильев А.В., Сухановский А.Н., Рогачевский И. Что дают лабораторные эксперименты для понимания солнечной конвекции? .....	147
Ключанцев В.С., Шутов А.В. Гибридная МКЭ/МСЧ схема для сквозного моделирования повреждения и разрушения .....	148
Князев Д.В. Плоскопараллельное течение Пуазейля термовязкой жидкости под действием осевых градиентов давления и температуры .....	149
Князев Н.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б. Применение нелинейной математической модели для описания механической реакции клеток в условиях ползучести .....	150
Ковалев И.А., Колесникова А.Л., Гуткин М.Ю. Дислокационная релаксация напряжений в цилиндрическом квантовом кольце вблизи свободной	151

поверхности .....	
Козлов В.Г., Полежаев Д.А. Экспериментальное изучение динамики двухфазной среды в неравномерно вращающемся цилиндрическом слое .....	152
Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д. Течение жидкого металла, созданное вращающимися магнитными полями, в Т-образной цилиндрической ячейке ...	153
Кондратьев Н.С., Безверхий Д.С., Балдин М.Н., Подсердцев А.Н. Моделирование технологических процессов термомеханической обработки с учетом рекристаллизации .....	154
Коновалов В.В. Неустойчивость Рэлея-Тейлора на фронте испарения с учетом влияния высокочастотных вибраций .....	155
Корелин А.А., Труфанова Н.М. Анализ влияния производственных характеристик и геометрии кабеля при моделировании процесса пероксидной сшивки полиэтиленовой изоляции .....	156
Корнилин Д.А., Пономарев Р.С., Демин В.А. Экспериментальное исследование формирования оболочки линзованного оптического волокна при травлении ....	157
Косков М.А. Конвекция феррожидкости в гидродинамическом контуре, оснащённом термомагнитным насосом .....	158
Красников В.С., Безбородова П.А., Майер А.Е. Влияние водорода на пластическую релаксацию на границах зерен в алюминии .....	159
Красников В.С., Манухина К.Д., Латыпов Ф.Т., Воронин Д.С., Безбородова П.А., Майер А.Е. Упруго-пластический переход в нанокристаллическом алюминии с различными границами зерен .....	160
Красняков И.В., Бузмаков М.Д. Численное исследование роста эпителиальной ткани в условиях различных границ .....	161
Красняков И.В., Краснякова Е.А. Применение шварцшильда-преобразования для вычисления статистически значимых мер «энтропия» и «сложность» .....	162
Краснякова Е.А., Брацун Д.А., Сираев Р.Р., Шмыров А.В., Мизев А.И. Гравитационно-независимые релаксационные колебания, индуцированные эффектом Марангони в микроканалах .....	163
Кудряшев И.С., Изюмова А.Ю., Бартоломей М.Л., Плехов О.А. Оценка величины критической дистанции после лазерной ударной обработки .....	164
Кудряшев И.С., Шардаков И.Н. Моделирование влияния сварки стакана магнитной системы в маятниковом компенсационном акселерометре типа Q-flex на его выходной сигнал .....	165
Кузнецова Ю.Л. Модель интенсивного испарения капли раствора соли .....	166
Кузькин В.А., Трунова И.Н. Баллистическая термоупругость нелинейных цепочек .....	167
Курмоярцева К.А., Трусков П.В. Многоуровневая физически-ориентированная модель для описания деформирования поликристаллов с учетом взаимодействия дислокаций с границами зерен .....	168
Кустов Д.А., Никулин И.Л. Математическое моделирование излучения при изготовлении заготовок оптических волокон .....	169
Кучеровский А.С., Пантелеев И.А. Условия применимости структурного тензора для описания распределения ориентаций планарных дефектов	170

сплошности в твердом теле .....	
Кучинский М.О., Любимова Т.П., Галишевский В. А., Рыбкин К.А. Трехмерные тепловые карты в исследовании ультразвуковой кавитации в присутствии ПАВ	171
Лалин В.В., Семенов Д.А. Постановка в напряжениях и решение методом граничных элементов плоской задачи теории упругости .....	172
Лебедев А.В., Лысенко С.Н. Свойства магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем с неионогенным ПАВом ТВИН20 .....	173
Левин Л.Ю., Семин М.А., Лузин Р.Д., Суханов А.Е. Исследование закономерностей тепломассообмена в атмосфере тупиковой выработки калийного рудника при изменении режима работы комбайнового комплекса ...	174
Легенький Н.М., Беляева А.В., Попова Е.Н., Сухановский А.Н. Лабораторное исследование влияния городского рельефа на циркуляцию в нижнем слое атмосферы .....	175
Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомоллов А.В., Опутин М.А. Общая схема формирования стратификации водных масс в зонах переменного подпора на Камском водохранилище в районе г. Березники .....	176
Лесникова Ю.И., Каменских А.А. Оценка влияния температуры на поведение оптического волокна типа PANDA .....	177
Лукашов Р.В., Антонов С.Д., Волков Г.А., Остропико Е.С., Груздков А.А., Петров Ю.В. Об особенностях испытаний по определению динамической прочности материалов .....	178
Любимова А.А., Кучумов А.Г. Влияние моделей крови на гемодинамические характеристики течения в сосудах Виллизиева круга с аневризмами .....	179
Любимова Т.П., Любимов Д.В., Садилов Е.С. Свободная конвекция около твердого включения в насыщенной жидкостью пористой среде при нагреве сверху .....	180
Майер А.Е., Манухина К.Д., Вшивков А.Н., Плехов О.А. Численно-экспериментальное исследование процесса лазерной ударной проковки на примере меди .....	181
Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В. Исследование закрученных течений жидкого металла в цилиндрической ячейке с Т-образным сечением .....	182
Манухина К.Д., Красников В.С., Майер А.Е. Пластическая деформация в нанокристаллическом алюминии на границах зерен вращения .....	183
Матвеев В.П., Сероваев Г.С. Особенности измерения деформаций распределенными волоконно-оптическими датчиками на основе рэлеевского рассеяния .....	184
Матвеев В.П., Фёдоров А.Ю., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Зайцев А.В. Определение модулей упругости и коэффициентов Пуассона разномодульных материалов .....	185
Мезенцева А.М., Смородин Б.Л. Поведение суспензии микроорганизмов при модуляции поля тяжести .....	186
Меленев П.В. Численное исследование отклика бидисперсной магнитной жидкости .....	187
Мешкова В.Д., Ветров А.Л., Филимонов С.А., Шульженко П.Д., Литвинцев	188

К.Ю. Дектерев А.А. Оценка качества микромасштабной модели атмосферы воздуха sigma-прогнозировать аэрационный режим городской застройки с использованием данных полевых исследований .....	
Мизева И.А., Дзя Я, Хи Ю Реализация метода определения дисфункции микроциркуляции на основе локального теплового теста в носимом устройстве	189
Митрополит И.Ю., Колесниченко И.В. Численное исследование характеристик закрученных потоков жидкого металла .....	190
Морозов И.А., Беляев А.Ю. Индентирование жестких слоев на мягкой полимерной подложке .....	191
Мосина Р.М., Кривилев М.Д., Романов К.А. Влияние микроструктуры материала на анизотропию механических свойств при 3Д-печати металлами ...	192
Мохирева К.А., Свистков А.Л., Шадрин В.В. Особенности математического моделирования вязкоупругих материалов при конечных деформациях .....	193
Мусихин А.Ю., Зубарев А.Ю. Моделирование упругих свойств магнитных эластомеров .....	194
Мушанкова К.А., Степанова Л.В. Анализ атомистических полей напряжений у вершины трещины методом молекулярной динамики: упругий и неупругий режимы деформирования .....	195
Назарова Е.Д., Филин В.Ю. Способы правки криволинейных заготовок для проведения испытаний на трещиностойкость .....	196
Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В., Игнатъев П.С., Никитюк А.С., Уваров С.В. Критическая динамика клеточных структур в условиях онкологических трансформаций и микрогравитации .....	197
Нежинская Л.С., Боровков А.И., Маслов Л.Б., Жмайло М.А., Тарасенко Ф.Д. Исследование упругопластических свойств мета-биоматериалов. Натурные и виртуальные испытания .....	198
Нечаева А.В., Шалагаев В.В., Полянский В.А. Эффект повышения ударной вязкости при наводороживании стальных образцов .....	199
Никитин А.Д., Шанявский А.А., Саурин В.В. Исследование механизмов разрушения СЛП материалов в области сверхмногоциклового усталости .....	200
Никитин И.С., Никитин А.Д., Стратула Б.А. Исследование усталостного разрушения при высокочастотном нагружении материалов, полученных методом селективного лазерного плавления .....	201
Никитюк А.С., Наймарк О.Б. Механобиология клетки в условиях микрогравитации .....	202
Новак Е.В., Пьянзина Е.С., Кузнецов А.А., Канторович С.С. Влияние магнитной анизотропии на динамический отклик магнитной нанокомпозитной частицы .....	203
Нурмухаметов Д.И., Чеснокова М.А., Гордеева А.И., Пономарев Р.С. Полимерный мост как основа волоконно-оптического датчика температуры ....	204
Нуштаев Д.В., Ардатов К.В. Оценка моментно-поворотной характеристики узлов крепления фронтальных стеллажей .....	205
Оборин В.А., Банников М.В., Соковиков М.А., Наймарк О.Б. Долговечность титановых и алюминиевых сплавов при комбинированном динамическом и	206

последующем сверхмногоцикловом нагружении .....	
Огородников Л.Л., Поплевин А.В. Теоретическое описание процесса формирования песчаных структур на поверхности дна в периодическом течении .....	207
Озерных В.С., Колесниченко И.В. Взаимодействие противоположно вращающихся вихревых МГД-течений .....	208
Окатыев Р.С., Зиканов О.Ю., Фрик П.Г., Колесниченко И.В. Неустойчивость течения Гартмана при линейном распределении электропроводности по толщине слоя .....	209
Окатыев Р.С., Степанов Р.А., Фрик П.Г. Об особенностях спектрального анализа данных на поверхности сферы .....	210
Осипенко М.А. Обобщение одной контактной задачи для струн .....	211
Пантелеев И.А., Ложкин Д.В., Ляховский В.А. Ориентация зоны локализованной поврежденности в хрупком твердом теле при истинном трехосном сжатии .....	212
Пантелеев И.А., Ломакин И.С., Барях А.А. Учет дефектности соляных пород при оценке несущей способности целикров .....	213
Панькова Н.В., Мизёв А.И. Влияние пленки сурфактанта на структуру осредненного течения, генерируемого полупогруженной осциллирующей сферой .....	214
Паршакова Я.Н., Висков М.В., Катаев Р.И., Картавых Н.Н. Исследование эффективности изоляции фильтрационных вод ТКО грунтовыми защитными сооружениями .....	215
Паршакова Я.Н., Иванцов А.О., Катаев Р.И., Картавых Н.Н., Висков М.В. Аспекты моделирования динамики фильтрационных вод в грунтовой толще основания полигона ТКО .....	216
Пахомов М.А. Исследование вдува кольцевой газокапельной струи в поперечный турбулентный нагретый поток .....	217
Пепеляев А.А., Лобов Е.С., Ташкинов М.А. Механические свойства 3D-печатных гибридных полимерных композитов, армированных коротким и непрерывным волокном .....	218
Пермякова Э.В., Голдобин Д.С. Экспоненциальные временные разностные схемы высокого порядка для жестких систем с недиагональной линейной частью .....	219
Петров Д.А., Гуткин М.Ю. Критические условия образования продольных и поперечных дислокаций несоответствия в симметричном двухслойном цилиндре .....	220
Петухов М.И., Демин В.А. Границы сквозной электромиграции для диссоциативных процессов в жидких диэлектриках .....	221
Петухов Д.С., Келлер И.Э. Оценка усталостной прочности детали при наличии остаточных напряжений: учёт выдержек и частоты при нерегулярном нагружении .....	222
Пинягин Д.С., Труфанова Н.М. Математическое исследование процессов тепломассопереноса в скважине с призабойным нагревателем различной	223

конструкции .....	
Пирогова Ю.В., Ташкинов М.А. Проектирование структуры 3d-печатных скаффолдов на основе концепции метаматериалов .....	224
Подкина Н.С., Кузнецова Е.В. Влияние термообработки листового материала на эксплуатационные характеристики деталей из терморасширенного графита .	225
Полежаев Д.А., Терёхина А.В. Измерение извилистости пористых материалов при изучении диффузии флуоресцентного красителя в жидкости .....	226
Полудницин А.Н, Шарифулин А.Н. Динамика гистерезисных переходов конвективного течения воды в наклоняемом квадрате .....	227
Полуянов А.О., Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В. Течение жидкого металла в щелевом канале насоса бегущего поля .....	228
Полуянов А.О., Колесниченко И.В. Исследование нестационарных колебаний в течениях жидкого металла в переменном магнитном поле .....	229
Поперечный И.С. Продольные моды релаксации взвешенной в жидкости суперпарамагнитной наночастицы .....	230
Поспелов Д. Р., Семин М.А. Особенности прочностного расчёта ледопородных ограждений в условиях высоких внешних нагрузок .....	231
Поташев К.А., Мазо А.Б., Баушин В.В., Мухина М.В., Салимьянова Д.Р. Модель фильтрации в трубках тока для быстрого и высокоточного проектирования повышения нефтеотдачи пласта .....	232
Прокопьев С.А., Любимова Т.П. Спектральный радиус матриц итерационных методов для уравнения Кана-Хилларда .....	233
Радушнов Д.И., Елфимова Е.А., Зверев В.С. Намагниченность текстурированного ансамбля обездвиженных взаимодействующих феррочастиц: влияние ориентации статического магнитного поля .....	234
Разумовский Е.С., Шавшуков В.Е. Накопление повреждений в бедренном компоненте эндопротеза тазобедренного сустава из УУКМ при перегрузках ....	235
Райхер Ю.Л., Голдобин Д.С. Расход жидкости из резервуара, движущегося вдоль горизонтальной плоскости .....	236
Роговой А.А., Столбова О.С. Моделирование процесса переориентации мартенситных вариантов в сплаве Гейслера в магнитных и силовых полях .....	237
Роготнев А.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б. Исследование механических свойств эпителия в рамках статистико-термодинамического подхода .....	238
Романов Д.К., Калугин А.Г. Волны на поверхности раздела вязких жидкостей с переменным коэффициентом поверхностного натяжения .....	239
Романов К.А., Швейкин А.И., Трусков П.В. Многоуровневые конститутивные модели: модификация для описания измельчения зерен в технологических процессах обработки металлов .....	240
Руденко Ю.К., Винниченко Н.А., Пуштаев А.В., Плаксина Ю.Ю., Уваров А.В. Восстановление турбулентного числа Прандтля с помощью физически-информированной нейросети .....	241
Рудой Е.М., Саженов С.А., Фанкина И.В., Фурцев А.И. Многомасштабный анализ квазистатического поведения термоупругого композита, армированного тонкими волокнами .....	242

Русанов М.С., Елфимова Е.А., Зверев В.С. Динамическая восприимчивость концентрированной феррожидкости: тестирование аппроксимационной формулы на данных компьютерного моделирования .....	243
Рыжков А.В. Модель магнитной полимеросомы, содержащей переносимое вещество .....	244
Сабиров Р.Р., Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Плехов О.А. Изучение влияния лазерной ударной обработки на поведение титанового сплава втб в условиях гигацикловой усталости .....	245
Савиковский А.В., Семенов А.С. Вычисление коэффициентов интенсивности напряжений через $J_k$ -интегралы для анизотропных материалов .....	246
Садиллов Е.С. Неустойчивость двухслойной системы, состоящей из проводящей и диэлектрической жидкостей, движущихся под действием сил Ампера и тяжести .....	247
Садовченко Е.А., Жмайло М.А., Черновол Е.М. Моделирование процесса установки дентальных имплантатов с применением конечно-элементного анализа .....	248
Садыкова Ю.А., Статник Е.С., Салимон А.И., Корсунский А.М. исследование микроразмерной анизотропии механических свойств $\alpha$ - $\beta$ фаз в сплаве ВТ6 с помощью испытаний микроколонн на сжатие в камере СЭМ .....	249
Салихова Н.К., Дудин Д.С., Келлер И.Э., Петухов Д.С. Численное и экспериментальное исследование собственных деформаций и остаточных напряжений, возникающих при различных способах термомеханической обработки .....	250
Салтыков И.Р., Кривилев М.Д., Харанжевский Е.В. Расчет механических характеристик керамического покрытия на основе В4С-BN-C .....	251
Сахабутдинова Л.Р., Носов Ю.О., Николаев А.В. О численном моделировании деформирования прототипа изоляционной перемычки в процессе гидрозакладки горной выработки .....	252
Сбоев И.О., Любимова Т.П., Кучинский М.О., Рыбкин К.А. Исследование распределений акустического давления и зон кавитационной активности в жидкости: численное моделирование и эксперимент .....	253
Седова Ю.С. Анализ результатов испытаний кольцевых образцов котельных труб с помощью механических моделей водородной хрупкости .....	254
Селиванов Г.Д., Котельникова Н.В. Учет геометрии межзеренной границы в статистической модели разрушения поликристаллов .....	255
Селютина Н.С., Петров Ю.В. Разработка релаксационно-кинетической модели для прогнозирования единой усталостной кривой .....	256
Селютина Н.С., Хайретинова Д.Д. Влияние скоростного и температурного режимов нагружения на динамическую прочность бетонов .....	257
Серебренников А.М. Квантовая гидродинамика на основе функций Лагранжа и Гамильтона: резонансные эффекты, нелокальность, геометрические фазы .....	258
Серебренников А.М. Суперпозиционная механика сред для характеристики систем, эволюция которых определяется спиновой поляризацией .....	259
Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Конюхов В.А. Применение волоконно-оптических датчиков на основе рэлеевского рассеяния для определения остаточных	260

деформаций изделий, созданных методом послойного наплавления .....	
Сираев Р.Р. Моделирование броуновской динамики молекулы ДНК в поле конвективного течения .....	261
Сметанников О.Ю., Фасхутдинова Ю.Б., Ильиных Г.В. Моделирование термоусаживаемой трубки из сшитого полиэтилена для внутренней изоляции труб .....	262
Смирнов С.В., Пестов А.В., Осипова В.А., Соловьева Я.В. Деформационные свойства дисперсно-упрочненного эпоксидного композита ЭД-20/10% ТПО2 вблизи температуры стеклования .....	263
Смольянов И.А., Зиканов О.Ю. Влияние выноса магнитного поля на поведение МГД потоков .....	264
Сморозин Б.Л. Конвекция бинарной смеси в модулированном внешнем поле .....	265
Соковиков М.А., Симонов М.Ю., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение механизмов локализации пластического сдвига при высоких скоростях деформирования как критического явления, обусловленного коллективным поведением ансамблей дефектов .....	266
Соколов Д.Д., Юшков Е.В. Фарадеевское вращение излучения галактических джетов .....	267
Соколов Е.А., Калюжная Д.А, Ряполов П.А. Моделирование и расчет сил, действующих на каплю воды в магнитной жидкости .....	268
Соломонов Д.Г. Ускоренная оценка предела выносливости типовых элементов инженерных конструкций из композиционных материалов тепловым методом .....	269
Сомов С.А., Косков М.А., Иванов А.С., Степанов Г.В. Испытания демпфера на основе эластомера в условиях вибрации .....	270
Сомов С.А., Иванов А.С. Термоконцентрационная конвекция в газовых смесях: эксперимент и обработка интерферограмм .....	271
Сорокин Ф.Д., Кирюхин А.А. Приложение «роторного» способа описания вращения к задаче о затягивании в резонанс разгоняемого ротора .....	272
Староверов О.А., Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И., Сивцева А.В. Деформирование и разрушение слоисто-волоконистых полимерных композитов в условиях предварительных циклических и ударных воздействий .....	273
Старцев Ю.К. Исследование особенностей протекания механической релаксации в силикатных стеклах с одним и двумя щелочными катионами ....	274
Старцев Ю.К. Физико-механические свойства слоев стекла, изменённых ионным обменом .....	275
Статник Е.С., Лумба Л.Т., Конев С.Д., Салимон А.И., Корсунский А.М. Расчетно-экспериментальная корреляция для повышения надежности проектирования сложных деформируемых конструкций .....	276
Степанов Р.А., Васильев А.Ю., Сухановский А.Н., Кузанын К.М., Клиорин Н.И. О разделении масштабов в турбулентной конвекции .....	277
Степанов Р.А., Гладких А.В., Ташкинов Г.А. Эффект синхронизации в нелинейной модели солнечного динамо .....	278
Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Деформация магнитоактивного кантеливера, лежащего на горизонтальной плоскости .....	279



Струкова В.И., Носов Ю.О., Каменских А.А. Идентификация модели фотополимерного материала .....	280
Ступникова А.В., Брацун Д.А. Активное управление роботизированной жидкостью в тороидальной конвективной петле .....	281
Субботин И.М., Иванов А.О. Численный расчёт динамики релаксации намагниченности монодисперсного ансамбля неподвижных магнитных частиц .....	282
Субботин С.В., Козлов В.Г. Экспериментальное изучение массопереноса через границу капли, осциллирующей в заполненном жидкостью круглом канале ....	283
Сухановский А.Н., Гаврилов А.А., Васильев А.Ю., Попова Е.Н. Влияние скорости вращения на структурные изменения в лабораторной модели общей циркуляции атмосферы .....	284
Тарасова А.С., Ташкинов М.А. Особенности поведения цилиндрических ауксетиков при термомеханическом нагружении .....	285
Тихвинский Д.В., Куянова Ю.О., Бервицкий А.В., Станкевич Ю.А., Чутков Д.С. и Паршин Д.В. Церебральная ангиоархитектоника в норме и при патологиях – эффект дислокации артерий .....	286
Третьяков Я.А., Безверхий Д.С., Кондратьев Н.С. Моделирование испытания образца на одноосное растяжение с применением модели материала Johnson–Cook .....	287
Трунин А.С., Юров А.В. Бризер комплексного двумерного нелинейного уравнения Клейна-Гордона .....	288
Тупицына А.Д., Паршин Д.В. Механика стенок артерий в норме и при патологиях на основе данных прочностных тестов и клинических измерений ...	290
Уваров С.В., Банников М.В., Оборин В.А. Методика испытания образцов из хромоникелевого сплава 42ХНМ на сверхмногоцикловую усталость при повышенных температурах .....	291
Усманов А.Р. Определение допусков вала газотурбинного двигателя по его рабочему прогибу .....	292
Усманов А.Р. Определение крутильных колебаний разнотолщинного вала .....	293
Устинов К.Б., Гандилян Д.В. Упруго-пластический изгиб прямоугольной пластины по цилиндрической поверхности .....	294
Устинова К.С. Калибровка конечно-элементных моделей системы «бетонная гравитационная плотина – основание» на основе данных натурных наблюдений .....	295
Уточкин В.Ю., Брацун Д.А. Бифуркации течений Хеле-Шоу в условиях равномерного вращения .....	296
Фагалов А.Р. Оценка возможности отверждения каркаса надувной конструкции на орбите за счет солнечного излучения .....	297
Фатталова Д.Р., Гордеев Г.А., Ломаев С.Л. Влияние оптоакустического эффекта на формирование зеренной структуры металла в аддитивных технологиях .....	298
Фашевский А.П., Лазарева Е.Н., Мыльников А.М., Наволокин Н.А., Янина И.Ю. Оценка параметров кровотока и эритроцитов при развитии онкопатологии .....	299
Фёдоров А.Ю., Матвеев В.П. Численное моделирование подземных трубопроводов при проседании земной поверхности .....	300

Федоров Е.В., Майер А.Е. Тензорная корректировка расчета производных в методе SPH .....	301
Филатов С.В. Экспериментальное наблюдение различных турбулентных режимов вращающейся турбулентности на диаграмме Россби-Рейнольдса .....	302
Филимонов С.А., Гаврилов А.А., Литвинцев К.Ю., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Васильев А.Ю. Моделирование движений свободноплавающего зеркального погруженного тела с двумя степенями свободы при радиационном нагреве дна .....	303
Фомин Е.В., Брюханов И.А. Исследование эволюции микроструктуры в ГЦК металлах с помощью методов машинного обучения и эксперимента .....	304
Фомин Л.В., Далинкевич А.А., Басалов Ю.Г. Длительное разрушение составного растягиваемого стержня в процессе ползучести с учетом влияния активной среды .....	305
Фомченкова М.А., Степанова Л.В. О точности решений в рядах, представляющих поля напряжений вблизи трещины в линейно упругих телах ..	306
Фрейдин А.Б., Иванова А.Б. Связанные задачи хемомеханики для упругого и вязкоупругого продукта реакции .....	307
Фрик П.Г., Плешков Р.А. Редкоинверсный хаос в модели динамо Рикитаке .....	308
Фукалов А.А., Зайцев А.В., Баяндин Ю.В. Равновесие упругой трансверсально-изотропной сферы, жестко закрепленной на внешней поверхности, находящейся под действием массовых сил .....	309
Хабин М.Р., Марышев Б.С. Транспорт примеси через наклонную пористую колонну .....	310
Халилов Р.И., Балашов В.А. Натриевый испытательный стенд .....	311
Хлыбов О.А., Иванцов А.О., Любимова Т.П. Средняя форма капли на твердой подложке, совершающей высокочастотные малоамплитудные вибрации .....	312
Хорошев Д.В., Ильялов О.Р. Моделирование позвоночно-двигательного сегмента L4-L5 с учетом связок: гиперрецепция в фасеточном суставе .....	313
Хрипченко С.Ю., Тонков Е.Ю. Сравнение конструкций МГД перемешивателей .....	314
Хрипченко С.Ю., Тонков Е.Ю. Течения расплавленного металла в теплом верхе кристаллизатора машины непрерывного литья при воздействии МГД-перемешивателей различной конструкции .....	315
Худякова В.А., Предеин В.В., Жилин С.Г., Богданова Н.А. Влияние химического состава шихтовых материалов на физико-механические свойства интерметаллидных железоалюминиевых сплавов, получаемых алюмотермией .....	316
Цветков Р.В., Гусев Г.Н., Епин В.В. Мониторинг вибрационных процессов конструкции с помощью МЭМС акселерометра .....	317
Цинкер М.Ю., Трусков П.В., Нурисламов В.В. Моделирование течения воздуха в упруго-деформируемой пористой среде, аппроксимирующей легкие человека .....	318
Чаплий Д.В., Степанова Л.В., Белова О.Н. Автомодельность накопления поврежденности в окрестности трещины в условиях ползучести. Конечно-элементное моделирование .....	319
Чемезова Е.А., Соловьева А.Ю., Елфимова Е.А. Намагниченность фракталоподобных агрегатов суперпарамагнитных наночастиц: влияние внутренней структуры .....	320

Черепанов И.Н., Смородин Б.Л. Конвекция бинарной смеси в ячейке Хеле-Шоу под действием переменного теплового поля .....	321
Чириков Д.Н., Зубарев А.Ю. Степанов Г.В. Изгиб магнитного эластомера под действием внешнего магнитного поля .....	322
Чутков Д.С., Тихвинский Д.В., Дубовой А.В., Гоголев А.В., Паршин Д.В. Гемодинамика бифуркации сонной артерии в норме и при стенозе .....	323
Шадрин В.В. Механические свойства грудных силиконовых имплантатов .....	324
Шакиров Н.В., Судаков А.И. Моделирование течения нелинейных жидкостей в зазоре между коаксиальными цилиндрами .....	325
Шалимов А.С., Ташкинов М.А. Моделирование роста трещин в костной ткани и скаффолдах со случайной структурой с использованием метода XFEM .....	326
Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О. Оценка применимости линейной модели пьезокерамического актуатора для задач вибродиагностики .....	327
Шарифулин В.А., Любимова Т.П. Исследование течения жидкого стекла от локального источника тепла .....	328
Шарифулин В.А., Белобородов Ф.С., Шарифулин А.Н., Любимова Т.П. Управление крупномасштабными режимами конвекции воздуха в квадратной полости движением крышки .....	329
Шестаков А.В., Фрик П.Г. Статистические свойства каскадных моделей турбулентности .....	330
Шешенин С.В., Кузьмин М.А., Артамонова Н.Б. Высшие асимптотические приближения для неоднородных пластин .....	331
Шмаков Е.И. Влияние высших пространственных гармоник на потоки в плоских линейных индукционных насосах .....	332
Шубенков И.С., Любимова Т.П. Конвекция бинарной смеси с эффектом Соре в наклонном трёхслойном пористом пласте с разной проницаемостью слоёв под действием вертикального градиента температуры .....	333
Шутов А.В., Уфимцев К.П. Применение эрзац моделей для эффективного моделирования материалов с субструктурой .....	334
Юрлова Н.А. Эффективность применения различных механизмов диссипации энергии для управления диссипативными свойствами электровязкоупругих систем .....	335
Яваров А.В., Тяпкина П.А., Федосеев А.В., Лалин В.В. Получение сейсмограмм кинематических воздействий массовых взрывов по результатам обработки инструментальных записей колебаний .....	336
Якимов Т.А., Шарифулин А.Н. Управление режимами вибрационной конвекции в цилиндрической полости в невесомости .....	338



# **ТЕЗИСЫ ПЛЕНАРНЫХ ДОКЛАДОВ**

## **КОМПЛЕКСНЫЕ АДАПТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА: ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ**

Васильев О.В.

*Центр технологий материалов Сколковский институт науки и технологий, Москва*

[O.Vasilyev@skoltech.ru](mailto:O.Vasilyev@skoltech.ru)

Численное моделирование задач механики жидкости и газа является одной из самых сложных областей вычислительной математики в основном из-за нелинейности уравнений Эйлера и Навье-Стокса, большого разнообразия режимов и физики течений и необходимости разрешения широкого спектра масштабов, неравномерно распределённых в пространстве и времени.

В докладе будет представлена принципиально новая философия численного моделирования, основанная на осознании необходимости тесной интеграции математического моделирования, адаптивных численных методов и алгоритмов генерации и адаптации расчетной сетки для более гибкого учёта физики задачи, минимизации вычислительных ресурсов, улучшения качества и эффективности численного моделирования и повышения степени прогнозирования физических свойств моделируемых систем. Ключевым элементом интегрального подхода адаптивного многомасштабного численного моделирования является класс вычислительных методов на основе вейвлетов, обеспечивающий системный подход для численного решения широкого класса задач механики жидкости и газа, способный однозначно определять, выделять, разрешать и отслеживать локальные структуры решения на динамически адаптивных вычислительных сетках с активным контролем ошибки решения.

Для расширения области применения разработанных адаптивных вейвлетных методов для решения задач со сложной геометрией, включая подвижные и деформируемые границы, разработан класс методов штрафных функций, позволяющих определение произвольных граничных условий на границе областей сложной геометрии с возможностью оценки и активного контроля ошибки решения. Общность формулировки и возможность накладывать произвольные граничные условия на стационарных и подвижных границах, по функциональности, гибкости и простоте применения близкая к определению аналитических граничных условий, а также эффективность совместного применения разработанных адаптивных вейвлетных методов и методов штрафных функций проиллюстрированы на примере решения широкого спектра задач механики жидкости и газа, включающих течения вязкой несжимаемой жидкости, вязкого и невязкого сжимаемого газа, в том числе дозвуковые и сверхзвуковые, инертные и химически реагирующие, ламинарные, переходные и турбулентные течения как в простой, так и в сложной геометрии.

## ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ИДЕАЛЬНОЖЁСТКОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЛ

Георгиевский Д.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

[georgiev@mech.math.msu.su](mailto:georgiev@mech.math.msu.su)

Обсуждаются особенности динамических постановок краевых задач о нахождении напряжённо-деформированного состояния в тонких идеальножёсткопластических телах, материалы которых можно считать несжимаемыми. Рассматриваются две задачи, иллюстрирующие характерное динамическое поведение в двух типах тонких тел.

В первой из них исследуется напряжённо-деформированное состояние, возникающее при динамическом растяжении однородного идеальножёсткопластического, подчиняющегося критерию Мизеса – Генки. В осесимметричной постановке учитывается возможность утолщения либо утоньшения сечения по длине стержня, что моделирует шейкообразование и дальнейшее развитие шейки. Вводятся три безразмерные функции времени, одна из которых малый геометрический параметр – отношение среднего радиуса к половине длины стержня. Отношения порядков малости двух других безразмерных функций к малому геометрическому параметру определяют влияние на картину распределения напряжений и скоростей деформаций инерционных слагаемых в уравнениях движения. На разных временных интервалах эти отношения могут быть разными, что обуславливает тот или динамический режим растяжения. Таких характерных режимов выявлено два, один из них связан с достаточно большой скоростью удаления торцевых сечений друг от друга, второй с ускорением. В последнем из перечисленных случаев проведённый анализ на основе метода асимптотического интегрирования позволил найти параметры напряжённо-деформированного состояния, являющегося «инерционной поправкой» по отношению к квазистатическому состоянию, реализующемуся в стержне с цилиндрической боковой поверхностью.

В другой задаче исследуется динамическое сжатие тонкого идеальножёсткопластического слоя абсолютно жёсткими плитами, движущимися с постоянными скоростями навстречу друг другу, включает два характерных безразмерных параметра. Один из них – малый геометрический параметр  $\alpha$ , равный отношению толщины слоя к его длине – явно зависит от времени, причём со временем растёт порядок его малости по отношению к другому безразмерному параметру – не зависящей от времени величине, равной обратному числу Эйлера. Эта величина принимается также много меньшей единицы. В зависимости от соотношения указанных параметров, т.е. на различных временных интервалах, с помощью процедуры асимптотического интегрирования строятся решения в виде разложений по целым степеням  $\alpha$ . Обосновывается правомерность поиска решения в данной форме. Показывается возможность гладкой сшивки по времени асимптотических разложений. Определяется отношение указанных параметров, при которых поправка в выражении для давления, вызванная инерционными слагаемыми, становится того же порядка, что и слагаемых, участвующих в классическом решении Прандтля квазистатической задачи.

## **ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ И АКУСТИКИ МНОГОФАЗНЫХ, МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД**

Губайдуллин Д.А.

*Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*  
[gubaidullin@imm.knc.ru](mailto:gubaidullin@imm.knc.ru)

Представлены некоторые результаты изучения волновой динамики и акустики многофазных сред. Дано сравнение теоретических и экспериментальных данных, рассмотрены приложения.

Изучено распространение акустических возмущений в парогазовых полидисперсных (с произвольной функцией распределения включений по размерам) и дискретных многофракционных капельных и пузырьковых (с оболочкой вокруг пузырька) средах, а также в смесях жидкости с полидисперсными частицами разного сорта и пузырьками газа. Представлены математические модели, получены наиболее общие дисперсионные соотношения, исследованы высоко- и низкочастотные асимптотики коэффициента затухания, обсуждаются области применимости развитых теорий. Выведено уравнение радиальных колебаний пузырька, покрытого вязкоупругой оболочкой в вязкоупругой жидкости. Установлено существенное влияние оболочки вокруг пузырька газа на распространение волн в пузырьковых жидкостях. Выявлено хорошее согласие представленных результатов с опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Исследовано распространение импульсных волн давления в жидкости, содержащей многослойные преграды разного сорта. Проведены расчеты по искажению акустического сигнала при диагностике многослойного образца, содержащего слой жидкости с полидисперсными пузырьками. Проиллюстрировано согласие теоретических и экспериментальных данных.

Теоретически и экспериментально изучены нелинейные колебания аэрозолей и поведение частиц в трубах в ударно- и безударно волновом режимах. Установлена немонотонная зависимость времени осаждения табачного дыма от степени заполнения закрытой трубы при резонансных частотах колебания поршня. Представлены результаты численных расчетов распространение ударных волн в газозвесах и ударно-волновой разлет газозвеси в двухкомпонентный газ. Проиллюстрировано влияние сорта газа на динамику процесса. Показано хорошее согласие теории и опытных данных.



## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТТРАКТОРОВ ВНУТРЕННИХ И ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН

Ерманюк Е.В.

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

[ermanyuk@hydro.nsc.ru](mailto:ermanyuk@hydro.nsc.ru)

Исследование волновых процессов во вращающейся и стратифицированной жидкости представляет большой интерес в технических приложениях, а также гео- и астрофизической гидродинамике. Внутренние и инерционные волны удовлетворяют специфическому дисперсионному соотношению, в которое входит частота возмущающего воздействия и направление распространения волн, но не входит масштаб длины. В зависимости от сочетания параметров, характеризующих геометрию жидкой области, частоту плавучести, вращения и возмущающего воздействия, в замкнутых областях могут наблюдаться различные режимы движения, в том числе высокоэнергетические, такие как волновые аттракторы и нормальные моды. В астрономических приложениях упомянутые режимы играют важную роль в процессе приливного захвата (синхронизации) в системах естественный спутник – центральное тело. В докладе представлено современное состояние исследований глобальных энергетических характеристик волновых аттракторов и нормальных мод. В частности, большое внимание уделено анализу численной и экспериментальной оценки мощности, затрачиваемой на поддержание волнового движения в системе, допускающей существование аттракторов внутренних волн. Выполнено сопоставление различных способов оценки потока энергии в системе, включающих как метод прямой оценки мощности, подводимой к волнопродуктору, так и косвенный метод, основанный на восстановлении поля давлений по данным измерений поля скорости методом PIV. Проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами прямого численного моделирования с помощью метода спектральных элементов Nek5000.

### Литература

Shmakova N., Makridin Z., Rudaya Ya., Chebotnikov A., Boyko O., Ermanyuk E. The power of internal wave attractor // *Phys. Fluids*. 37, 016607 (2025); doi: 10.1063/5.0245269

## ОРИЕНТАЦИОННОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ФЕРРОЖИДКОСТЯХ/ФЕРРОКОМПОЗИТАХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Иванов А.О.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург*

[Alexey.Ivanov@urfu.ru](mailto:Alexey.Ivanov@urfu.ru)

Одной из жидкостей с особыми свойствами является феррожидкость, представляющая собой коллоидную взвесь магнитных наночастиц в жидком носителе. Для предотвращения агрегирования и седиментационной неустойчивости в феррожидкостях используются однодоменные наночастицы ферро-(ферри-, антиферри-)магнитных материалов с характерным размером 10 - 15 нм. Энергии магнитной анизотропии в таких маленьких частицах оказывается недостаточной для фиксации макроскопического магнитного момента вдоль оси легкого намагничивания в кристаллической решетке магнетика, и магнитный момент претерпевает суперпарамагнитные флуктуации. Это означает, что к трансляционным и ориентационным степеням свободы наночастиц добавляются степени свободы, описывающие суперпарамагнитное вращение магнитных моментов внутри наночастиц относительно их осей легкого намагничивания. В отсутствие внешнего магнитного поля тепловое движение приводит к полной хаотизации по всем степеням свободы.

В присутствии магнитного поля феррожидкость становится анизотропной, поскольку появляется выделенное направление магнитных моментов, преимущественно ориентированных вдоль поля. В ансамбле суперпарамагнитных наночастиц появляется дополнительное структурирование в пространстве направлений легких осей [1-3], несмотря на то, что магнитное поле не оказывает на них прямого воздействия. Однако магнитное поле ориентационным образом влияет на направления магнитных моментов, разворот которых сопровождается за счет магнитной анизотропии появлением вращающего момента, приводящего к развороту самой наночастицы, т.е. к повороту ее оси легкого намагничивания. Если в этот момент осуществить «быстрое» затвердевание (полимеризацию) жидкой матрицы, то будет получен феррокомпозит с обездвиженными наночастицами, трансляционные и вращательные степени свободы которых будут исключены, а основную роль начнут играть суперпарамагнитные степени свободы магнитных моментов, вращающихся внутри неподвижных наночастиц. Такой феррокомпозит обладает анизотропией в ориентациях легких осей и демонстрирует аномалии макроскопических свойств.

В докладе обсуждаются влияние магнитного поля на ориентационное структурирование легких осей в зависимости от энергии магнитной анизотропии, влияние концентрации и интенсивности межчастичного магнито-дипольного взаимодействия. Приводится сопоставление теоретических расчетов с данными компьютерного моделирования.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-12-00039.

### Литература

- [1] Solovyova A.Yu., Elfimova E.A., Ivanov A.O. Magnetic properties of textured ferrocomposite consisting of immobilized superparamagnetic nanoparticles // *Physical Review E*. – 2021. – V. 104, Iss. 6. – art.num. 064616.
- [2] Ivanov A.O., Elfimova E.A. Pair correlations of the easy magnetisation axes of superparamagnetic nanoparticles in a ferrofluid/ferrocomposite // *Nanoscale*. – 2024. – V. 16, Iss. 33. – P. 15730-15745.
- [3] Ivanov A.O., Solovyova A.Yu., Elfimova E.A. The effect of magnetic field on the orientational ordering of easy magnetization axes in superparamagnetic nanoparticles // *Journal of Molecular Physics*. – 2024. – V. 400. – art.num.124493.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВИХРЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Исаев С.А.

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного  
маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург*

[isaev3612@yandex.ru](mailto:isaev3612@yandex.ru)

Интенсификация теплообмена является актуальной областью теплофизики по наукометрическим данным, начиная с 2005 года. Конструирование энергоэффективных структурированных поверхностей на основе вихревых генераторов давно находится в центре внимания. Опережающий рост теплоотдачи от них в сочетании с умеренным ростом гидравлических потерь в трактах по сравнению с гладкими стенками характерен для упорядоченных вогнутостей. Интенсификация сопутствующих гидродинамических процессов в наклонных протяженных канавках со сферическими законцовками связывается с ростом местных скоростей потока до величин соразмерных с характерной и превосходящей ее. В центре внимания открытия формирования экстраординарных перепадов давления, обусловленных торможением потока на наветренных склонах и самогенерацией смерчеобразных структур во входных сферических сегментах. Аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в канавках характеризуется многократным ростом абсолютных величин отрицательного трения и числа Нуссельта относительно величин для плоской стенки [1]. Экспериментально и численно установлено, что она реализуется при глубинах и длинах канавок свыше 0.2 и 3 в долях их ширины соответственно, в диапазоне углов наклона от 25 до 80 градусов при числах Рейнольдса от 250 до 200000. Прогнозируемая максимальная относительная суммарная теплоотдача для рельефов с наклонными канавками для ламинарного и турбулентного режима достигает 3-4 при отстающем росте относительных гидравлических потерь, а максимальное локальное ускорение скорости в ядре потока доходит до 1.5 раз по отношению к максимальной скорости потока в плоскопараллельном канале [2]. Детально рассмотрены постановки задач внутренней и внешней аэродинамики и теплообмена структурированных канавками поверхностей с особым вниманием к определению гидравлических потерь и обоснованию выбора SST-модели турбулентности, в частности с коррекцией на кривизну линий тока. Валидация основанного на многоблочных вычислительных технологиях пакета VP2/3 выполняется при сравнении баз данных измерений датчиками давления, методами SIV и градиентной теплотометрии, полученных на экспериментальных стендах НИИ механики МГУ, КазНЦ РАН и СПбПУ Петра Великого, с численными прогнозами на их цифровых двойниках [3-5].

### Литература

- [1] Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163 (Part A). P. 202–207.
- [2] Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2022. №5. С.13-24.
- [3] Исаев С.А., Судаков А.Г., Никущенко Д.В., Усачов А.Е., Зубин М.А., Синявин А.А., Чулюнин А.Ю., Дубко Е.Б. Тесты для валидационных задач аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на структурированных поверхностях с экстраординарными перепадами давления. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2023. №.5. С.70-81.

- [4] Исаев С.А., Сапожников С.З., Никущенко Д.В., Митяков В.Ю., Сероштанов В.В., Дубко Е.Б. Аномальная интенсификация вихревого теплообмена при отрывном обтекании воздухом наклонной канавки на нагретом изотермическом участке пластины. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2024. №1. С.52-62.
- [5] Исаев С.А., Мильман О.О., Михеев Н.И., Никущенко Д.В., Душин Н.С., Клюс А.А., Осюк Е.А. Взаимосвязь локального ускорения ламинарного потока в канале с аномальной интенсификацией теплообмена в двухрядных наклонных канавках. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2024. №4. С. 28-52.

## ОСОБЕННОСТИ ОСРЕДНЕННОЙ ВИБРАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОЛОСТЯХ

Козлов В.Г.

Пермский государственный гуманитарно - педагогический университет, Пермь  
[kozlov@pspu.ru](mailto:kozlov@pspu.ru)

Обсуждаются особенности осредненных вибрационных эффектов в неоднородных по плотности гидродинамических системах во вращающихся полостях. Колебания системы, ответственные за осредненные эффекты, возбуждаются осциллирующими во вращающейся системе отсчета силовыми полями. Наряду с инерционными полями, вызываемыми вибрациями вращающейся полости, анализируется влияние статических внешних силовых полей, вызывающих приливные колебания неоднородных по плотности систем. Рассматриваются неизотермические однофазные системы и многофазные, образованные несмешивающимися жидкостями. В первом случае возбуждается вибрационная тепловая конвекция. Во втором осцилляции приводят к изменению формы межфазной границы и генерации потоков.

Вибрационная тепловая конвекция во вращающихся системах демонстрирует ряд специфических черт, связанных с действием силы Кориолиса как на осциллирующую, так и на осредненную компоненты скорости [1]. Качественное отличие вибрационной конвекции во вращающихся полостях от классического случая (в отсутствие вращения), заключается в изменении структуры конвективных потоков и порога устойчивости с безразмерной скоростью вращения [2,3]. Для исключения (подавления) центробежного термоконвективного механизма экспериментальные исследования выполняются в области малых или отрицательных значений центробежного числа Рэлея. Большой интерес представляет осредненная тепловая конвекция в полостях, равномерно вращающихся вокруг горизонтальной оси [4,5]. «Вибрационная» тепловая конвекция в этом случае возбуждается приливными колебаниями жидкости в отсутствие каких-либо вибраций. Важное изменение структуры виброконвективных течений обнаруживается также при возбуждении резонансных инерционных колебаний вращающейся жидкости – инерционных мод [6, 7].

В двухжидкостных системах при быстром вращении, когда центробежное поле обеспечивает устойчивую осесимметричную границу раздела, эффективной оказывается модуляция скорости вращения. В случае контраста вязкостей жидкостей и их различного взаимодействия с границами осциллирующей полости на межфазной границе создается осциллирующий тангенциальный разрыв скорости. Последний приводит к серии ярких и важных в прикладном плане эффектов: пороговому возбуждению квазистационарного «замороженного» рельефа на границе [8] и генерации осредненных потоков, которые интенсифицируют массообменные процессы на межфазной границе. Не меньший интерес представляют резонансные эффекты [9], обнаруженные в вертикальной щелевой полости при определенных частотах модуляции скорости вращения вокруг горизонтальной оси.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 23-11-00242).

[1] Козлов В.Г. *Изв. РАН. МЖГ.* – 2004. – № 1. – С. 5–14.

[2] Kozlov V.G., Ivanova A.A., Vjatkin A.A., Sabirov R.R. *Acta Astronautica.* – 2015. – V. 112. – P. 48–55.

[3] Vjatkin A.A., Kozlov V.G., Sabirov R.R. *International Journal of Thermal Sciences.* – 2019. – V. 137. – P. 560–570.

[4] Иванова А.А., Козлов В.Г., Рылова В.В. *Изв. РАН. МЖГ.* – 2003. – № 1. – С. 12–21.

[5] Vjatkin A. A., Kozlov V. G., Siraev R. R. *Fluid Dynamics.* – 2017. – V. 52. – No. 4. – P. 526–535.

[6] Vjatkin A., Petukhov S., Kozlov V. *Fluid Dynamics & Materials Processing.* – 2024. – V.20. – No.11.

[7] Rysin K.Y. *Fluid Dynamics & Materials Processing.* – 2024. – V.20. – No.10. – P. 2235-2249.

[8] Kozlov V.G., Zimasova A.R. and Kozlov N.V. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer.* – 2024. – V.12. – No.1.

[9] Kozlov V., Petukhova M., Kozlov N. *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 2023. – 20220082.

## РЭК: РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СЛУЖЕБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Корсунский А.М.<sup>1,2</sup>, Равикович Ю.А.<sup>2</sup>, Рипецкий А.В.<sup>2</sup>, Назаров Е.В.<sup>2</sup>, Холобцев Д.П.<sup>2</sup>, Иванов Н.С.<sup>2</sup>, Чумаевский А.В.<sup>3</sup>, Колубаев Е.А.<sup>3</sup>, Плехов О.А.<sup>4</sup>, Статник Е.С.<sup>1,2</sup>, Салимон А.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва

<sup>2</sup>Московский Авиационный Институт (МАИ), Москва

<sup>3</sup>Институт Физики Прочности и Материаловедения (ИФПМ СО РАН), Томск

<sup>4</sup>Пермский Федеральный Исследовательский Центр (ПФИЦ УрО РАН), Пермь  
[a.korsunsky@skoltech.ru](mailto:a.korsunsky@skoltech.ru), [korsunskijam@mai.ru](mailto:korsunskijam@mai.ru)

Доклад посвящен научному обоснованию и практической демонстрации эффективности многомасштабной цифровой расчетно-экспериментальной корреляции для решения задач обеспечения прочности деталей планеров и двигателей самолетов из перспективных материалов, включая аддитивно произведенные металлические (АПМ) и полимерные композиционные (ПКМ) материалы.

Представлен подход к научному и практическому обоснованию метода цифровой расчетно-экспериментальной корреляции и демонстрация применений технологии цифровой корреляции изображений для поддержки отработки деталей планеров и двигателей самолетов посредством пирамиды расчетно-экспериментальных исследований.

Рассматриваются перспективы применения метода машинного обучения моделей репрезентативных объемов материала для построения предсказательных кривых механических свойств на основе микромеханических расчетов и испытаний, моделей репрезентативных объемов с машинным обучением в процессе отработки деталей планеров и двигателей самолетов посредством пирамиды расчетно-экспериментальных исследований.

### Литература

- [1] Kyarimov R.R. *et al.*, Factorial-experimental investigation of LPBF regimes for VZh159 nickel superalloy grain structure and structural strength optimization. *Front. Mater.*, (11) 2024 <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1470651>
- [2] Osipovich K. *et al.*, On the Peculiarities of Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing (WEBAM) of Nickel Alloy–Copper Bimetal Nozzle Samples. *Crystals* 14(11) 2024, 976 <https://doi.org/10.3390/cryst14110976>
- [3] Chumaevskii A.V. *et al.*, Analysis of the Structure and Properties of As-Built and Heat-Treated Wire-Feed Electron Beam Additively Manufactured (WEBAM) Ti-4Al-3V Spherical Pressure Vessel. *Metals* 14(12) 2024, 1379 <https://doi.org/10.3390/met14121379>
- [4] Statnik E.S. *et al.*, Mechanical testing of miniature carbon fiber reinforced polymer (CFRP) samples under digital light microscopy. *Fracture and Structural Integrity*, 71(19) 2025, <https://dx.doi.org/10.3221/IGF-ESIS.71.17>

## РЕШЕНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ 3Д-ПЕЧАТИ МЕТАЛЛОМ

Кривилев М.Д.

Удмуртский государственный университет, Ижевск  
mk@udsu.ru

Технология 3Д-печати металлическими порошками относится к одному из наиболее передовых способов металлообработки. Формирование изделий методами селективного лазерного плавления (СЛП) и прямого лазерного выращивания (ПЛВ) позволяет изготавливать детали с тонкими структурными элементами и внутренними полостями [1]. При этом обеспечивается их высокая механическая прочность, сравнимая или превышающая прочность литых изделий. Важно отметить, что высокая пространственная локализация сопряженных процессов теплообмена и деформации приводят к значительным сложностям на этапах проектирования и подбора режимов 3Д-печати. С этой целью диапазон рабочих параметров установок подбирается методами физического и инженерного моделирования, что требует как решения систем дифференциальных уравнений в частных производных, так и использования методов оптимизации многопараметрических систем [2].

В докладе проводится обзор основных физико-химических процессов, возникающих в зоне лазерного плавления (наплавки) материала. Обсуждаются капиллярные эффекты в зоне обработки и гидродинамическая устойчивость поверхности расплава. Анализируется влияние химического состава порошков на термокапиллярные эффекты, оценивается формирование устойчивых и квазиустойчивых режимов течения. Во второй части доклада обсуждаются тепловые режимы наплавки, сопряженные с плавлением, кристаллизацией и последующим охлаждением материала. На примере решения практических задач показано, что высокие скорости охлаждения в диапазоне от  $10^4$  до  $10^5$  К/с приводят к высоким остаточным напряжениям, составляющим до 50–70% от предела текучести, что способствует короблению. Обсуждается управление механизмами теплоотвода для снижения деформации изделия, а также управления формирующейся микроструктурой и анизотропией механических свойств.

Обзорный доклад включает результаты работ ведущих групп в предметной области исследований. Практическая значимость демонстрируется на примере первой полнофункциональной российской системы инженерного анализа «Виртуальный 3Д-принтер» Госкорпорации РОСАТОМ, обеспечивающей весь комплекс расчетных методик при подготовке к 3Д-печати изделий сложной геометрии [3].

### Литература

- [1] Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения – Санкт-Петербург, 2016. – 400 с.
- [2] Кривилев М.Д. Двухуровневое математическое моделирование процессов переноса и структурообразования в металлургии мезоскопических объемов: дис. .. докт. физ.-мат. наук: 05.13.18. – Удмуртский государственный университет, 2017. – 316 с.
- [3] Программный комплекс «Виртуальный 3Д-принтер», версия 1.0. Свидетельство №2023683505 о государственной регистрации программы для ЭВМ. – Москва, ФИПС, 2023 г.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДХОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА УРАВНЕНИЯХ КИНЕТИКИ, ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ, БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА И ШРЁДИНГЕРА, ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА**

Кривцов А.М. <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

[akrivtsov@bk.ru](mailto:akrivtsov@bk.ru)

Рассматривается одномерное уравнение Шрёдингера без учета потенциала взаимодействия. Показывается, что уравнение, наряду с движением квантовой частицы, также описывает распространение изгибных волн в балке Бернулли-Эйлера. Для балки строятся уравнения переноса энергии и показывается, что они эквивалентны уравнениям газовой динамики со специфическим законом теплопроводности. Методами кинетики анализируется безстолкновительный газ, удовлетворяющий тем же уравнениям. Строится гауссово решение, справедливое для упомянутых четырех моделей: кинетической, газодинамической, Бернулли-Эйлера и Шрёдингера. На основе проведенного анализа обсуждается выбор моделей при численном моделировании процессов переноса в сплошных средах.



## **НАНОСТРУКТУРЫ В ЖИДКОСТИ, ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ЖИВОЙ ПРИРОДЕ**

Мулюков Р.Р.

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

*[imsp@imsp.ru](mailto:imsp@imsp.ru)*

При углублении в метастабильную область жидкости критический размер пузырька новой фазы (пара) уменьшается до нанометровых размеров. При приближении к спинодали, линии абсолютной устойчивости жидкости, изотермическая сжимаемость и изобарическая теплоемкость устремляются к бесконечности. Однако, как показали измерения, при углублении метастабильную область вплоть до линии достижимого перегрева поведение теплофизических характеристик не претерпевает качественных изменений, их величины могут быть рассчитаны линейной экстраполяцией по изотермам из области стабильных состояний жидкости.

Формирование наноструктуры в металлах и сплавах приводит к количественному, а иногда и к качественному изменению их свойств. Исследования многоуровневой структуры наноматериалов позволило предложить двухфазную модель их строения. Приведены примеры практического использования разработанных наноматериалов в машиностроении, энергетике и перспективы применения в медицине.

Рассмотрены бактериальные риски, возникающие при установке ортопедических и зубных имплантов. Наноструктурная морфология поверхности листьев растений, поверхности живых существ обладает антибактериальными свойствами. Предложена технология формирования антибактериальной природоподобной поверхности имплантов.

## КРИТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ

Наймак О.Б

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[naimark@icmm.ru](mailto:naimark@icmm.ru)

Экспериментальные исследования поведения конденсированных сред в широком диапазоне интенсивностей нагружения показывают ограниченность предположения о «адиабатическом подчинении» механических свойств структурным переменным, отражающих поведение дефектов. Процессы деформации при ударно-волновом и динамическом нагружении характеризуются близкими временами нагружения к временам развития дефектов, структурной релаксации, стадийности зарождения трещин и их распространения. Это предполагает рассмотрение процесса деформирования и разрушения в терминах структурных переменных, характеризующих дефекты, включая термодинамику, влияние на релаксационные свойства. Развитая в [1] статистическая термодинамика сред с дефектами позволила установить новый тип критических явлений — структурно-скейлинговые переходы и соответствующие им типы метастабильных состояний, с реализацией которых связываются качественные изменения дисперсионных свойств, автомодельные механизмы переноса импульса, развития локализованных неустойчивостей, стадийности разрушения. Динамика структурно-скейлинговых переходов, обусловленная формированием коллективных мод дефектов (автосолитонные и диссипативные структуры обострения), установила качественные изменения дисперсионных свойств, соответствующих появлению «щелевых состояний» (GMS-Gapped Momentum States) [2]. Данные состояния формируют пространственные масштабы, на которых реализуются пластические механизмы переноса импульса и диссипации в конденсированных средах в широком диапазоне интенсивностей воздействия. Показано, что степенная универсальность пластических волновых фронтов (зависимости Swegle-Grady) в диапазоне скоростей деформаций  $10^5$ - $10^7$  с<sup>-1</sup>, формирование «волн разрушения», асимптотика вязкости обусловлены реализацией «щелевых состояний» при подчинении механизмов релаксации автомодельным коллективным модам дефектов сдвига. Развитые представления о связи «щелевых состояний» с автомодельными реакциями конденсированных сред при ударно-волновых нагружениях иллюстрируются данными оригинальных экспериментов по регистрации и моделированию степенной универсальности пластических волновых фронтов и кинетики распространения усталостных трещин, статистическими закономерностями фрагментации [3],

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы 124020200116-1.

### Литература

- [1] Naimark O.B., Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua // In: Advances in multifield theories of continua with substructure. Ed.: G.Capriz, P.Mariano.- Boston, Birkhauser.- 2004. - P.75-114
- [2] Naimark O.B. Defects Induced Criticality and Gapped Momentum States in Condensed Matter//Procedia Structural Integrity. - 2021. - V.32. - P.144-151 <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.021>.
- [3] .Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. Critical Dynamics of Damage-Failure Transition in Wide Range of Load Intensity // Acta Mechanica. - 2021. - V.232. - P.1943–1959 <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02922-1>.

## "ПАРАДОКСЫ" ДИНАМИКИ И РАЗРУШЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Петров Ю.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет  
Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург  
[y.v.petrov@spbu.ru](mailto:y.v.petrov@spbu.ru)*

Традиционный квазистатический подход к анализу физических явлений часто создает иллюзию парадоксов там, где их на самом деле нет. Почему же наша интуиция подводит нас при изучении динамических процессов?

Обсуждаются особенности деформирования и разрушения сплошных сред в динамике, которые радикально отличаются от привычных квазистатических представлений. Демонстрируется, почему классические «равновесные» модели оказываются бессильными при объяснении многих динамических эффектов, и почему простая экстраполяция статических принципов и критериев разрушения на динамический случай часто приводит к ошибочным выводам.

Особое внимание уделяется роли сингулярностей в описании предельных состояний материалов. Сингулярность здесь выступает не просто как математический объект, а как концентрированное выражение физической сущности исследуемого процесса. Именно в ней заключены ключевые интегральные и энергетические характеристики явления, которые невозможно выявить, опираясь только на локальные континуальные представления.

Показано, как синтез глубокого физического анализа с *классическими моделями* нестационарной динамики открывает мощный инструментарий механики для понимания и прогнозирования кажущихся парадоксальными эффектов. Этот подход позволяет объяснить сложные динамические явления, не прибегая к искусственному введению новых сущностей, и открывает перспективные направления для дальнейших исследований в области механики твердого тела.

## ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПРИ РАЗУШЕНИИ МЕТАЛЛОВ

Полянский В.А.<sup>1</sup>, Беляев А.К.<sup>1</sup>, Седова Ю.С.<sup>1</sup>, Яковлев Ю.А.<sup>1</sup>,

Полянский А.М.<sup>2</sup>, Нечаева А.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИПМаш РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ООО «НПК ЭПТ», Санкт-Петербург

<sup>3</sup>АО «Научно-диагностический центр «Научно-производственная фирма «Русская лаборатория», Санкт-Петербург

[pva@ipme.ru](mailto:pva@ipme.ru)

Обязательные при любом проектировании и технической диагностике конструкций расчет на прочность и предсказание ресурса работы базируются на моделях разрушения и данных о прочности материалов. Известные теории прочности позволяют предсказать в какой момент при возрастании внешней нагрузки произойдет разрушение металлического образца. Но точность такого прогноза для конструкции, даже под статической нагрузкой, как правило, невелика. Особенно если металл конструкции работает в сложном напряженно-деформированном состоянии. Это заставляет конструкторов, ориентироваться при расчетах не на предел прочности, а на предел текучести.

Второй по значению проблемой расчетов на прочность является то, что известные механизмы разрушения не просчитываются из физических соображений. Расчет прочности, выполненный, например, основании величины энергии образования свободной поверхности, дает пределы прочности, которые от 10 до 40 раз больше реальных. Для практических задач важно выявить механизмы, которые так сильно влияют на прочность конструкций, способы их предсказательного математического описания и управления ими.

Как показывают сопоставления опытных данных, важную роль в процессе пластического течения и последующего разрушения играют силы поверхностного натяжения. Вторым важным, но малоисследованным феноменом является наводороживание металлов при разрушении. Этот феномен является всеобщим и наблюдается, как при деформациях металла, так и при его износе в парах трения с участием металлических поверхностей. Водород образуется за счет диссоциации атмосферной воды, адсорбированной на поверхности металла. При экспериментальных исследованиях, нами обнаружен еще один всеобщий феномен – разрушения металлов при диффузии в них водорода. При этом, самопроизвольно, даже при отсутствии внешней нагрузки, образуются: микропоры, микротрещины по границам зерен и сквозные трещины, объединяющие эти повреждения металла. Сочетание всех трех эффектов в металле конструкций, работающих под нагрузкой, приводит к тому, что металл превращается в систему с положительной обратной связью. Деформации приводят к насыщению водородом поверхностного слоя, диффузия водорода из него внутрь металла приводит к образованию поврежденного слоя с массой микропор и микротрещин, на берегах которых из адсорбированной из атмосферы воды образуется дополнительный водород. Этот водород дополнительно снижает силы поверхностного натяжения на границах монокристаллических зерен, что приводит к увеличению деформаций. Когда поврежденный слой становится достаточно толстым, к процессу разрушения добавляется существенный рост внутренних напряжений из-за уменьшения несущего сечения конструктивных элементов, что усиливает обратную связь и ускоряет разрушение. Отдельные этапы такого процесса уже промоделированы.

Требуются дополнительные исследования, для замыкания обратной связи в модели разрушения. В имеющихся моделях этому препятствует уравнение сплошности. Оно не позволяет учесть напряжения, возникающие вследствие образования пустот, заполнения их водородом, воздухом, а затем – и водой.

## СТАТУС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ 1-3 «БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ» ЦКП «СКИФ»

Прууэл Э.Р.<sup>1</sup>, Студенников А.А.<sup>1</sup>, Рубцов И.А.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

<sup>2</sup> Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов" Федерального государственного бюджетного учреждения науки

"Федеральный исследовательский центр "Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук" (ЦКП "СКИФ")

[e.pruuel@g.nsu.ru](mailto:e.pruuel@g.nsu.ru)

На сегодняшний день в Новосибирской области (накоград Кольцово) идет строительство источника синхротронного излучения 4+ поколения ЦКП «СКИФ». В рамках научной программы первой очереди запланирован запуск шести исследовательских станций, одной из которых является станции 1-3 «Быстропротекающие процессы».

Оборудование станции спроектировано для проведения исследований быстропротекающих процессов требующих большой импульсной мощности излучения. Источником излучения для станции является сверхпроводящий вигглер с диапазоном энергий от 20 до 40 кэВ и мощностью рентгеновского излучения выходящего из фронтэнда 10 кВт. Апертура пучка на дальних элементах канала составит 10x100 мм. Запланированное оборудование, в том числе рентгеновские детекторы, позволит проводить исследования с временным разрешением лучше 100 нс.

Для снижения тепловой и радиационной нагрузки канал будет оборудован системой прерывания пучка, позволяющей пропустить на оптические элементы, исследуемый объект и детектор излучение только на время проведения эксперимента (от 100 мкс и более). Это позволит использовать на канале такие прецизионные инструменты как оптические щели, монохроматор, фокусирующее многосекционное зеркало и чувствительные рентгеновские детекторы.

Основным направлением станции является исследование быстропротекающих процессов, требующих для регистрации большой интенсивности излучения: детонационные свойства энергетических материалов, поведение вещества при ударном сжатии и импульсном разогреве, разрушение материалов и конструкций в условиях аварийного воздействия. Для создания ударных воздействий будут использоваться энергетические материалы и пневматические пушки.

На станции запланированы как рентгеновские методики с высоким временным разрешением: радиография, малоугловое рассеяние и дифракция, так и современные экспериментальные методы исследования быстропротекающих процессов. Это позволит в одном взрывном эксперименте проводить комплексное исследование сразу несколькими методиками.

## СВЯЗАННЫЕ ЗАДАЧИ ХЕМОМЕХАНИКИ: ПОСТАНОВКИ И РЕШЕНИЯ

Фрейдин А.Б.

*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

[alexander.freidin@gmail.com](mailto:alexander.freidin@gmail.com)

Хемомеханика изучает взаимосвязи химических реакций, диффузии и механических напряжений. Появление напряжений вследствие деформации, сопутствующей химической реакции, и влияние напряжений на скорость химической реакции вплоть до ее блокирования – факты, подтвержденные многочисленными экспериментами и имеющие важное значение, в том числе для инженерных приложений микроэлектроники, определения количества циклов заряд–разряд в литий-ионных батареях, работоспособности МЭМС.

Рассматривается химическая реакция между диффундирующим и деформируемым твердым компонентами типа окисления или литизации кремния. Вначале для реакции, локализованной на фронте, разделяющим превращенный и исходный материалы, обсуждаются:

- общая постановка связанной задачи хемомеханики («диффузия – химия – механика»), включающая уравнение диффузии с граничными условиями и условиями на фронте со стоком, определяемым скоростью реакции; уравнения механического равновесия с граничными условиями; определяющие соотношения для диффузионного потока и твердых компонентов реакции; кинетическое уравнение, определяющее скорость химической реакции в зависимости от механических напряжений и концентрации диффундирующего компонента;
- тензор химического сродства в хемомеханике как ключевой концепт, определяющий кинетику химической реакции и влияние на нее механических напряжений;
- кинетика и блокирование распространения фронта реакции в случае упругих компонентов реакции, в том числе влияние соотношения модулей упругости на блокирующие деформации и напряжения;
- влияние релаксации напряжений на распространение фронта реакции в случае вязкоупругого продукта реакции, в том числе при циклической внешней деформации;
- кинетический и квазиравновесный режимы распространения фронта реакции в случае вязкоупругого продукта реакции.

Демонстрируется принципиальная разница протекания химической реакции в случае упругого и вязкоупругого продуктов реакции, так как в отличие от случая упругих компонентов реакции, напряжения могут релаксировать, если в результате превращения даже изначально упругого тела появляется вязкоупругий материал. Это приводит к связанности кинетики распространения фронта реакции и процесса релаксации напряжений.

Затем рассматривается объемная химическая реакция, степень завершенности которой связывается с параметром фазового поля. Показывается, что в этом случае скалярное химическое сродство, определяющее скорость объемной реакции, может быть вычислено как нормальная компонента введенного ранее тензора химического сродства с нормалью, определяемой градиентом степени превращения. Приводятся примеры единого описания объемных и локализованных реакций и результаты исследования влияния параметров модели на степень локализации реакции.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8).

## ОСОБЕННОСТИ ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ МОДЕЛЬНЫХ ПЛАНЕТ ЗЕМНОГО ТИПА

Фрик П.Г.,<sup>1</sup> Сухановский А. Н.,<sup>1</sup> Степанов Р.А.,<sup>1</sup> Быков А.В.,<sup>1,2</sup> Ветров А.Л.,<sup>2</sup> Калинин Н.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
[frick@icmm.ru](mailto:frick@icmm.ru)

Модельные исследования общей циркуляции атмосферы учитывают сложный рельеф, неоднородный характер подстилающей поверхности и систему океанических течений. Такие модели не позволяют оценить воздействие базовых геофизических условий, определяющих характер общей циркуляции атмосферы. Представляет интерес рассмотреть модель земной атмосферы, которая, с одной стороны, точно воспроизводит реальные характеристики Земли, а с другой - предельно упрощает конфигурацию континентов и океанов, полностью игнорируя топологию реальной планеты [1,2]. В представленном исследовании поверхность планеты Земля была упрощена до двух типов деятельного слоя: сухая пустыня и море. Соотношения эти двух типов поверхности менялось с целью проявления особенностей общей циркуляции атмосферы. Инструмент моделирования - региональная численная модель атмосферы WRF-ARW в глобальной версии. Модель содержит основные уравнения гидродинамики и схему расчета важнейших энергетических процессов в атмосфере.

Целью исследования в данной постановке является анализ формирования крупномасштабных среднеширотных вихрей и волн на зонально однородной плоской планете с энергетическим балансом и свойствами атмосферы, аналогичными земным. Показано, что сохранение относительно небольшого экваториального океана на фоне плоской пустынной планеты достаточно для воспроизведения общей циркуляции атмосферы и динамики среднеширотных волновых и вихревых структур, планетарного и синоптического масштабов, реалистичных для Земли. Рассмотренная идеализированная система хорошо воспроизводит не только пространственную структуру возникающих бароклинных волн, но и их сезонную динамику, включая изменчивость спектрального состава наблюдаемых волн. Моды с волновыми числами 3-8 содержат основную часть энергии пульсаций. Спектры для высших мод характеризуются степенным законом с наклоном “-3.5” для зимнего сезона и “-3” для летнего сезона. В течение бароклинного сезона происходит уменьшение доминирующего волнового числа от  $m=7$  до  $m=4$ . Другой особенностью бароклинных волн в рассматриваемой конфигурации является значительная временная вариация фазовой скорости с двумя отчетливыми стадиями монотонного увеличения и уменьшения. Между началом постепенного увеличения фазовой скорости для разных мод существует временной разрыв. Высшие моды начинают ускоряться раньше, в результате чего низшие моды движутся медленнее высших. Временная эволюция интенсивности бароклинных волн хорошо описывается параметром Иди.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-61-00098

### Литература

- [1] Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П., Сухановский А., Калинин Н.А., Степанов Р.А. Численное моделирование предельных состояний планетарной атмосферы // Географический вестник. 2023. №4 (67). С.85-98.  
[2] Sukhanovskii A., Stepanov R., Bykov A., Vetrov A., Kalinin N., Frick P. Mid-latitude baroclinic waves in a zonally homogeneous Earth-like planet // Climate Dynamics. 2025. (in press).

## КОНЦЕПЦИЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Шутов А.В.<sup>1,2</sup>, Вардосанидзе О.Д.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

[alexey.v.shutov@gmail.com](mailto:alexey.v.shutov@gmail.com), [o.vardosanidze@g.nsu.ru](mailto:o.vardosanidze@g.nsu.ru)

Разработка нелинейных моделей деформирования твёрдых тел и построение соответствующих вычислительных алгоритмов является сложной задачей, требующей глубоких познаний в области механики определяющих соотношений, тензорного анализа и численных методов. В то же время исследователи-материаловеды зачастую строят одномерные модели материала, пригодные для описания одноосного нагружения. Такие упрощённые одноосные модели и соответствующие алгоритмы не годятся для конечно-элементного моделирования массивных конструкций. В настоящем докладе обсуждается концепция представительных направлений, позволяющая обобщать одноосные модели на случай произвольного многоосного нагружения [1, 2]. К достоинствам концепции относится автоматическое соблюдение принципа объективности, наследование термодинамической совместности и простота вычислительных алгоритмов. Кроме того, концепция пригодна для описания некоторых материалов с изначальной анизотропией [3].

Помимо базовой версии концепции, в докладе вводятся её альтернативные варианты. Так, в применении к моделированию полимеров обсуждается новый подход [4], оперирующий кластерами материальных волокон, а для моделирования конечных упругопластических деформаций металлов вводится новый  $w$ -инвариантный подход, генерирующий модели со свойством независимости от выбора отсчётной конфигурации. Эффективность концепции демонстрируется на примерах, включая моделирование волокнистых полимерных композитов с эффектами упругопластичности, вязкости и упрочнения; моделирование больших деформаций металлов с нелинейным эффектом Баушингера, а также моделирование изначально анизотропных кровеносных сосудов с эффектами упрочнения и повреждения при циклическом нагружении. Представленные примеры также раскрывают превосходство кластерного и  $w$ -инвариантного подходов над классической концепцией. В докладе дополнительно освещается вопрос построения эффективных расчётных схем, которые позволяют новым моделям конкурировать с более распространёнными тензорными определяющими соотношениями.

Работа выполнена при поддержке РНФ, код проекта 23-19-00514.

### Литература

[1] Freund M., Ihlemann J., Generalization of one-dimensional material models for the finite element method //ZAMM. – 2010. – т. 90, № 5. – с. 399-417.

[2] Shutov A.V., Laktionov P.P., Nekrasova Y.S., Extending uniaxial material laws to multiaxial constitutive relations: H-approach //European Journal of Mechanics - A/Solids. – 2020.– т. 81, 103937.

[3] Shutov A., Rodionov A., Ponomarev D., Nekrasova Y., Computationally efficient concept of representative directions for anisotropic fibrous materials //Polymers. – 2022.– т. 14, № 16. 3314.

[4] Shutov A.V, Vardosanidze O.D., Improved concept of representative directions: cluster approach //International Journal of Solids and Structures. – 2024. – т. 301, 112934.



# **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

## **ИНЖЕНЕРНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО АНТИФРИКЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО СЛОЯ В ОПОРНОЙ ЧАСТИ С ШАРОВЫМ СЕГМЕНТОМ**

Адамов А.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[adamov@icmm.ru](mailto:adamov@icmm.ru)

Неподвижные и линейно подвижные опорные части с шаровым сегментом (ОЧШС) и тонким сферическим слоем антифрикционного полимерного материала (АПМ) разделяются на 2 группы по способу восприятия горизонтальных нагрузок: 1-я группа ОЧШС воспринимает только вертикальные нагрузки, горизонтальные передаются на стальные упорные планки; 2-я группа воспринимает вертикальные и горизонтальные нагрузки сферическим слоем АПМ, расчёт параметров сферических поверхностей ОЧШС этой группы основан на учете взаимосвязи вертикальной и горизонтальной нагрузок.

ОЧШС 2-й группы предъявляют более высокие требования к механическим свойствам АПМ, но они имеют преимущества при замене устаревших катковых опорных частей, при демпфировании колебаний мостовых пролетов на скоростных железных дорогах.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) сферического слоя АПМ для ОЧШС 2-й группы возможен в рамках трехмерных контактных задач нелинейной вязкоупругопластичности, что требует больших затрат ресурсов для идентификации и верификации 3D-моделей поведения АПМ, для построения адекватных конечно-элементных моделей ОЧШС.

Для инженерного анализа распределения давления от вертикальной и горизонтальной нагрузок на поверхности контакта полированного стального шарового сегмента таких ОЧШС с тонким слоем АПМ, находящимся преимущественно в состоянии одноосного деформированного состояния (ОДС), разработана инженерная методика на основе идей метода А.Г. Кузьменко [1]. Необходимый для реализации методики эффективный модуль сжатия при ОДС с учетом объёмной сжимаемости смазки в лунках и сдвиговой податливости АПМ в окрестности лунок определяется экспериментально при испытании цилиндрических представительных образцов с лунками на торцах [2].

Методика реализована в Microsoft Excel, она позволяет при совместном действии наиболее неблагоприятной по напряжениям заданной комбинации вертикальной и горизонтальной нагрузок на ОЧШС, по заданному допустимому контактному давлению на АПМ определить: геометрические параметры шарового сегмента; смещения сегмента как жесткого целого по вертикали и горизонтали; функцию распределения контактного давления (нормальную составляющую напряжения) на поверхности контакта; оптимизировать распределение давления за счет подбора толщины слоя АПМ и/или параметров сферического углубления скользящей плиты на её краю; оценить критические или недопустимые комбинации вертикальной и горизонтальной нагрузок.

### Литература

- [1] Кузьменко А.Г. Контакт сферических тел, покрытых тонкими слоями // Проблемы трибологии. – 2001. – № 1. – С. 89-118.
- [2] Adamov A.A., Keller I.E., Ostrer S.G., Seletkov D.V. Evaluation of the Performance of Antifriction PTFE Composites at a Pressure Over 60 MPa. I. Comparison of Their Hardness and Deformation Properties Under Free and Constrained Compression // Mechanics of Composite Materials. – 2022. – Т. 58. – № 5. – С. 673-688.

## ВЯЗКОУПРУГИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОНАПОЛНЕННОЙ РЕЗИНЫ

Адамов А.А.<sup>1</sup>, Келлер И.Э.<sup>1</sup>, Кузьминых В.С.<sup>2</sup>, Иванов Я.Н.<sup>3</sup>, Утев Н.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

<sup>3</sup>АО «Новомет-Пермь», Пермь

[adamov@icmm.ru](mailto:adamov@icmm.ru), [kie@icmm.ru](mailto:kie@icmm.ru)

Манжета (резиновая цилиндрическая втулка) используется в конструкции пакера — устройства для разделения потоков жидкости в погружном нефтяном насосе. В процессе установки манжеты в рабочее состояние она расширяется внутренней конической вставкой и прижимается своей внешней поверхностью к внутренней поверхности трубы. Для численного исследования особенностей поведения манжеты в процессе ее установки выполнены испытания для определения вязкоупругих и трибологических свойств высоконаполненной резины в условиях сжимающих напряжений и комнатной температуры.

Рассмотрены три модели вязкоупругости, использующие линейный наследственный оператор обобщенного тела Максвелла в сочетании с двухконстантной аппроксимацией сдвиговой части упругого потенциала. Вязкоупругие константы находятся по данным испытаний на свободное сжатие цилиндрических образцов по программе деформирования с этапами нагружения с постоянной скоростью и релаксации. Модуль объемного сжатия находится из испытания на стесненное сжатие по циклической программе с этапами нагружения постоянной скоростью, разгрузки и выдержки. Модели, идентифицированные по части одного цикла, удовлетворительно предсказывают изменение напряжения при выполнении дальнейшей программы, а также при изменении скорости деформации.

Выполнены испытания на трение резинового диска по схеме плоскость-плоскость по полированной стальной поверхности со смазкой, в качестве которой использовались вода, масло МДПН-С и касторовое масло. Рассматривались циклические программы со ступенчато изменяющимися постоянными уровнями давления, а также с линейным ростом давления в процессе скольжения в паре трения. Обнаружен неограниченный рост коэффициента трения в первом испытании и ограниченность во втором, а также гистерезис в зависимости от знака скорости изменения давления. Зависимость коэффициента трения от давления от 0,5 до 20 МПа для обоих масел хорошо аппроксимируется убывающим степенным законом, различаясь в этом диапазоне в 10-20 раз. Коэффициент трения с касторовым маслом в качестве смазки оказывается ниже в 2-5 раз (в зависимости от давления) в сравнении с коэффициентом трения с маслом МДПН-С, а последний — ниже в 1,5-8 раз в сравнении с водой в качестве смазки. При увеличении шероховатости стальной пластины с 0,63 до 1,26 мкм коэффициент трения с обоими видами масел увеличивается в 2-3 раза, а с водой в качестве смазки зависимость более сложная и зависит еще и от дренажных свойств поверхности. Наблюдения демонстрируют зависимость вязкого трения резины от смачиваемости ее смазкой.

### Литература

- [1] Adamov A.A., Keller I.E., Ivanov Ya.N., Utev N.V. Basic tests and identification of a model of viscoelastic behavior of elastomers under finite deformations. *Mechanics of Solids*. 2024. No.7. В печати.
- [2] Адамов А.А., Келлер И.Э., Кузьминых В.С., Утев Н.В. Вязкое трение высоконаполненной резины о полированный стальной лист в зависимости от действия контактного давления // Трение и износ. Направлено в редакцию.

## **ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ**

Айзикович С.М.<sup>1</sup>, Волков С.С.<sup>1</sup>, Васильев А.С.<sup>1</sup>, Лапина П.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

[saizikovich@gmail.com](mailto:saizikovich@gmail.com), [fenix\\_rsu@mail.ru](mailto:fenix_rsu@mail.ru),

[andre.vasiliev@gmail.com](mailto:andre.vasiliev@gmail.com), [polina\\_azarova86@mail.ru](mailto:polina_azarova86@mail.ru)

Рассмотрена серия плоских, антиплоских и осесимметричных контактных задач теории упругости для тел с покрытиями. Задачи сведены к парным интегральным уравнениям, решения которых найдены в приближенном аналитическом виде. Решения асимптотически точны для тонких и толстых покрытий и обладают высокой точностью для покрытий произвольной толщины. Построены упрощенные решения в явном виде, удобном для проведения инженерных расчетов, и проанализирована их точность. На примере задачи кручения проиллюстрирована эффективность метода для тонких покрытий, функционально-градиентных покрытий сложной структуры и в случае, когда модули упругости покрытия и подложки отличаются на 2 порядка.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (договор № 23-49-10062).

## ДИНАМИКА КАПЛИ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ КРАЕВОГО УГЛА

Алабужев А.А.<sup>1,2</sup>, Пьянкова М.А.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

<sup>3</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

*alabuzhev@mail.ru, ya.kashina-marina@yandex.ru*

В данной работе предложена теоретическая модель электросмачивания на диэлектрической подложке с учетом насыщения динамического краевого угла от электрического напряжения в отличии от предыдущих работ [1,2]. Насыщение описывается функцией Ланжевена  $L(\beta)$  исходя из теории поляризации диэлектриков Дебая аналогично модели намагничивания парамагнетиков Ланжевена-Дебая [3,4]:  $\langle P \rangle = P_0 L(\beta)$ , где  $\langle P \rangle$  — компонента суммарного дипольного момента диэлектрика, параллельная напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$ ,  $P_0$  — суммарный дипольный момент полностью поляризованного диэлектрика (поляризация насыщения).

Для примера рассматриваются вынужденные колебания капли электролита, помещенной между двумя параллельными твердыми поверхностями в переменном электрическом поле. В состоянии механического равновесия капля имеет форму круглого цилиндра, ось симметрии которого перпендикулярна пластинам. Скорости линий контакта на обеих поверхностях зависят от внешней периодической силы электрического поля и отклонения краевого угла от его равновесного значения. Для описания неоднородности поверхности предполагается, что коэффициент пропорциональности является функцией координат. Эта функция может быть индивидуальна для каждой поверхности. Показано, что это приводит к возбуждению дополнительных азимутальных мод, в отличие от случая однородных поверхностей. Внешнее переменное электрическое поле тоже является пространственно-неоднородным, т.к. в экспериментах сложно добиться однородного поля при конечных размерах проводника. Обнаружено, что неоднородность пластин изменяет значение угла насыщения. Продемонстрировано качественное согласие с экспериментами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00379).

### Литература

- [1] Алабужев А.А., Кашина М.А. Влияние различия свойств поверхностей на осесимметричные колебания сжатой капли в переменном электрическом поле // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 8–9. – с. 662 – 676.
- [2] Kashina M.A., Alabuzhev A.A. The Forced Oscillations of an Oblate Drop Sandwiched Between Different Inhomogeneous Surfaces under AC Vibrational Force // Microgravity Sci. Technol. – 2021. – Vol. 33. – 35.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. 2-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 621 с.
- [4] Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978. – 788 с.

## **ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА С ГИСТЕРЕЗИСОМ КРАЕВОГО УГЛА**

Алабужев А.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
alabuzhev@mail.ru*

Исследуется влияние свойств подложек и размеров пузырька на его вынужденные колебания в пульсационном поле давления с учетом гистерезиса краевого угла. Ранее было показано [1–3], что при таком воздействии возбуждаются только радиальные (объемные) колебания пузырька и четные гармоники колебаний формы из-за движения линии контакта. Если пластины однородные, но с различающимися параметрами смачивания, то будут возбуждаться и нечетные гармоники. Пространственно-неоднородные поверхности подложек приводят к возбуждению азимутальных мод.

В отличие от несжимаемой капли, для сжимаемого пузырька существует явление двойного резонанса – равенство частоты радиальных колебаний какой-либо гармонике колебаний формы. Резонансный пик наиболее заметен, т.к. в этом случае коэффициент затухания объемной моды стремится к нулю. При наличии гистерезиса краевого угла существуют три режима колебаний для однородных одинаковых подложек: 1) прерывистое движение, аналогичное несжимаемой капле, 2) движение вблизи двойного резонанса, 3) нелинейные колебания в области неподвижной линии контакта. Последние два типа характерны только для сжимаемого пузырька.

Частота объемных колебаний сжимаемого пузырька может обращаться в нуль в определенном диапазоне значений параметра смачивания. Это определяется размерами пузырька (отношением равновесного радиуса пузырька к его высоте) и связано с затуханием колебаний на торцах пузырька. Для азимутальных мод пузырька (и несжимаемой капли) существует аналогичный эффект. Следовательно, размеры пузырька качественно меняют его динамику при одинаковых значениях параметра смачивания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00379).

### Литература

- [1] Алабужев А.А. Поведение цилиндрического пузырька под действием вибраций // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т.7, № 2. – С. 151-161.
- [2] Alabuzhev A.A. Influence of surface properties on axisymmetrical oscillations of a cylindrical bubble // Interfac. Phenom. Heat Transfer. – 2019. – V. 7(3). – P. 255-268.
- [3] Alabuzhev A.A. The influence of plate surface inhomogeneity on the oscillations of the confined gas bubble // Interfac. Phenom. Heat Transfer. – 2024. – V. 12(4). – P. 45-57.
- [4] Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978. – 788 с.

## СПЕЦИФИКА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ АНСАМБЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ОБЕЗДВИЖЕННЫХ ДИПОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Амбаров А.В.<sup>1</sup>, Елфимова Е.А.<sup>1</sup>, Зверев В.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург

[alexander.ambarov@urfu.ru](mailto:alexander.ambarov@urfu.ru), [ekaterina.elfimova@urfu.ru](mailto:ekaterina.elfimova@urfu.ru), [vladimir.zverev@urfu.ru](mailto:vladimir.zverev@urfu.ru)

Магнитные наночастицы, интегрированные в полимерную матрицу, образуют магниточувствительные композиты. Использование этих материалов в высокотехнологичных отраслях и биомедицинских приложениях растет благодаря возможности удаленного управления их свойствами с помощью внешнего магнитного поля. В процессе синтеза композитов, содержащих магнитные частицы с одноосной магнитной анизотропией, можно создать анизотропную ориентационную структуру осей легкого намагничивания частиц магнитного наполнителя, осуществляя отверждение матрицы-носителя в условиях внешнего магнитного поля. В предельном случае все оси легкого намагничивания частиц будут направлены вдоль магнитного поля. Такой композит может быть смоделирован как ансамбль неподвижных магнитных частиц с выровненными осями легкого намагничивания.

В работе исследуется динамический отклик системы взаимодействующих феррочастиц, находящихся в линейно-поляризованном переменном и постоянном магнитных полях. Релаксация магнитных моментов феррочастиц происходит по неелевскому механизму.

Вращательное движение магнитного момента случайной феррочастицы определяется из решения уравнения Фоккера-Планка-Брауна, в которое вводится дополнительное слагаемое, позволяющее учесть межчастичные диполь-дипольные взаимодействия на уровне модифицированной теории среднего поля первого порядка [1]. Полученные численные решения для плотности вероятности ориентации магнитного момента случайной частицы используются для определения динамических и релаксационных свойств.

В слабых переменных полях дополнительное действие постоянного магнитного поля приводит к уменьшению значений действительной части восприимчивости при малых частотах, а положение максимума мнимой части восприимчивости сдвигается в область высоких частот. Однако монотонная зависимость от интенсивности постоянного магнитного поля может нарушаться при увеличении амплитуды переменного магнитного поля.

Исследовано влияние постоянного магнитного поля на магнитную восприимчивость ансамбля обездвиженных взаимодействующих магнитных частиц с выровненными осями легкого намагничивания в переменном поле произвольной амплитуды. Получено аналитическое выражение, связывающее параметр магнитной анизотропии, амплитуду переменного магнитного поля, интенсивность постоянного магнитного поля и восприимчивость Ланжевена. Полученное выражение определяет промежутки монотонности динамической восприимчивости.

Полученные результаты представляют собой важную информацию для проектирования и синтезе новых функциональных материалов.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда № 23-12-00039.

Литература

[1] Ivanov A.O., Zverev V.S., Kantorovich S.S., *Soft Matter*, 12(15), 3507-3513 (2016).

## УСТОЙЧИВОСТЬ ФИГУР РЕЛО ПОД ДЕЙСТВИЕМ НОРМАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Андрюкова В.Ю., Тарасов В.Н.

Физико-математический институт ФИЦ Коми научный центр УрО РАН, Сыктывкар  
[veran@list.ru](mailto:veran@list.ru), [vntarasov@dm.komisc.ru](mailto:vntarasov@dm.komisc.ru)

Прямая называется опорной к выпуклой плоской фигуре, если она имеет общие точки с фигурой, и вся фигура лежит по одну сторону от прямой. Фигурой постоянной ширины называется выпуклая фигура, у которой расстояние между двумя любыми параллельными опорными прямыми одно и то же. Таким свойством обладает круг, а также треугольник Рёло – пересечение трех равных окружностей радиуса  $R$  с центрами в вершинах равностороннего треугольника. Треугольник Рёло состоит из трех дуг с центральным углом  $\frac{\pi}{3}$ . Таким же

образом можно составить  $n$  – угольники при нечетном  $n$ , множество таких фигур составляет счетное, всюду плотное подмножество во множестве фигур постоянной ширины. Предположим, что дуги треугольника Рёло нагружены нормальной нагрузкой, и  $w_i(\vartheta)$  – касательные перемещения точек дуг. Тогда полная энергия деформированного кольца [1] определяется формулой  $U = U_1 + U_2 + U_3$ , где  $U_i = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/3} (w_i'' + w_i')^2 dv - \frac{\rho}{2} \int_0^{\pi/3} (w_i''^2 - w_i'^2) d\vartheta$ .

Общее решение уравнения Эйлера для функционала  $U_i$  зависит от шести произвольных постоянных  $c_{1i}, c_{2i}, \dots, c_{6i}$ ,  $i = 1, 2, 3$ , которые, в свою очередь, линейным образом определяются через геометрические перемещения концов каждой дуги [2]:

$$w = c_1 \sin \vartheta + c_2 \cos \vartheta + c_3 \sin(\sqrt{1 + \rho} \vartheta) + c_4 \cos(\sqrt{1 + \rho} \vartheta) + \frac{1}{2 + \rho} (c_5 \vartheta + c_6).$$

Следует исключить только перемещение треугольника как жесткое целое. Получаем квадратичную форму от шести переменных. Безразмерная критическая нагрузка  $\rho$  определяется из условия равенства нулю определителя матрицы этой квадратичной формы. В результате численных экспериментов получено критическое значение параметра  $\rho = 13.05$ . Заметим, что для кругового кольца  $\rho = 3$ . Для фигуры Рёло, построенной на правильном пятиугольнике  $\rho = 10.20$ .

### Литература

- [1] Николаи Е.Л. Труды по механике задачи – М: Изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 583 с.  
[2] Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы – М: Изд-во СКАД СОФТ. Том 1. 2010. – 704 с.



## ВОССТАНОВЛЕНИЕ КАРТИН ПОЛОС, ПОЛУЧАЕМЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ В МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ: ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Анисимов Г.С.<sup>1</sup>, Степанова Л.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара  
*Anisimov.gs@ssau.ru, Stepanova.lv@ssau.ru*

Работа посвящена цифровой обработке, ее автоматизации, повышению качества и заполнению недостающих данных интерференционных картин, получаемых экспериментально для определения механических полей вблизи трещины в образцах различной конфигурации. При изготовлении образцов и их дальнейшем испытании интерференционно-оптическими методами [1] исследователь сталкивается с рядом проблем: сложностью испытаний, высоким искажением (зашумленностью) полученных изображений [2] при обработке интерференционных картин, полученных, например, голографическими методами, а также низкой наполненностью данными отдельных картин полос [3]. Для решения проблемы был использован стек технологий MERN (MongoDB, Express.js, React.js, и Node.js). Для качественной генерации изображений была создана искусственная нейронная сеть, опирающаяся на алгоритмы, приведенные в [4]. На рис. 1 представлены этапы обработки экспериментального и генерации искусственного изображений. Верхнее правое (рис. 1) – исходное изображение, верхнее левое – изображение, из которого были удалены все шумы и искажения, нижнее левое – изображение, прошедшее постобработку для лучшего определения краев полос (изохром/изоклин), нижнее правое – сгенерированное изображение.

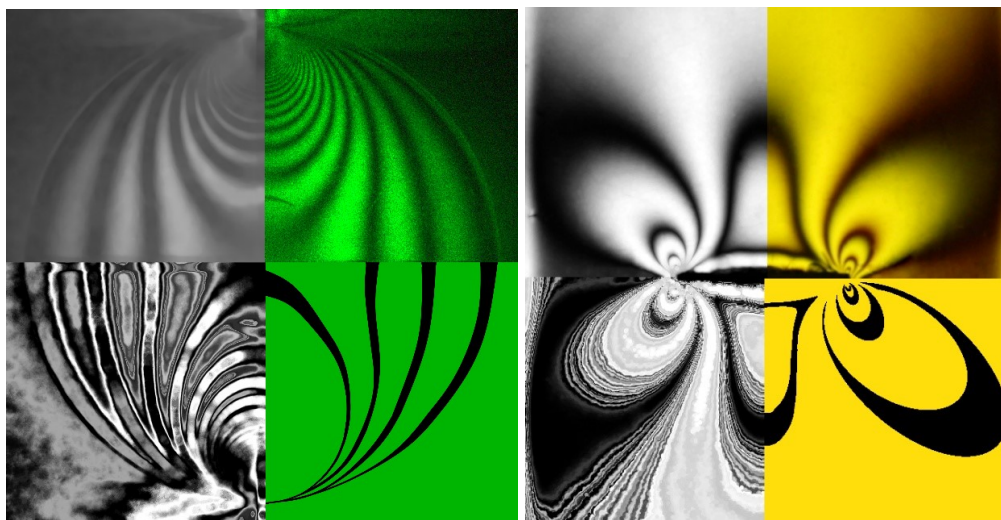


Рисунок 1 – Процесс обработки и генерации изображений

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 25-21-00272).

### Литература

- [1] Матвиенко Ю.Г. Основы физики и механики разрушения – Москва, 2022. – 144 с.
- [2] Ляхов П.А. Новый метод обнаружения и устранения случайного импульсного шума на изображениях // Компьютерная оптика. – 2023. – т. 47, № 2. – с. 262-271.
- [3] Анисимов Г.С., Степанова Л.В. Экспериментальное определение полей у вершины трещины: метод голографической интерферометрии и метод корреляции цифровых изображений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 3 – с. 39-56.
- [4] Агафонова Ю. Д., Гайдель А. В., Зельтер П. М., Капишников А. В., Эффективность алгоритмов машинного обучения и сверточной нейронной сети для обнаружения патологических изменений на магнитно-резонансных томограммах головного мозга // Компьютерная оптика. – 2020. – т. 44, № 2. – с. 266-273.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРУПРУГИХ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОПИСАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ**

Антонова О.В.<sup>1</sup>, Рововой Э.<sup>1,2</sup>, Охотников А.О.<sup>1</sup>, Иванов С.Д.<sup>1</sup>, Кабин Н.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

antonova\_ov@spbstu.ru, rovovoy99@gmail.com, okhotnikov@compmechlab.ru,  
ivanov.s@compmechlab.ru, kabin.n@compmechlab.ru

Данная работа посвящена анализу и исследованию особенностей применения гиперупругих моделей материалов для описания поведения различных медицинских изделий и биологически тканей, применяемых в современной медицинской практике, преимущественно в области кардиологии.

Исследования проведены на примере металлических коронарных стентов, баллонов для их установки, колец-протезов для проведения аннулопластики митрального клапана и покрытых эндобилиарных стентов. Также отдельное внимание уделено моделированию стенок сосудов. Рассмотрен ряд гиперупругих реологических моделей [1], позволяющих максимально достоверно описать поведение данных объектов. На основании результатов численного моделирования проанализированы особенности применения моделей Holzapfel-Gasser-Ogden [2], Ogden [3] и Drucker-Prager [4].

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы как основа для моделирования процессов установки коронарных и эндобилиарных стентов, колец протезов для проведения аннулопластики, оптимизации методик данных медицинских вмешательств, а также при разработке рекомендаций для медицинских работников.

### Литература

- [1] Wex, Cora, Arndt, Susann, Stoll, Anke, Bruns, Christiane and Kupriyanova, Yuliya. "Isotropic incompressible hyperelastic models for modelling the mechanical behaviour of biological tissues: a review" Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik, vol. 60, no. 6, 2015, pp. 577-592
- [2] Holzapfel G.A., Gasser T.C., Ogden R.W. A new constitutive framework for arterial wall mechanics and a comparative study of material models Journal of Elasticity, 61 (2000), pp. 1-48
- [3] Ogden, R. W. Large Deformation Isotropic Elasticity – On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 326, No. 1567 (1 February 1972), pp. 565–584
- [4] Drucker D., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design Quarterly of Applied Mathematics, 10 (2) (1952), pp. 157-165

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЕСКОВ В УСЛОВИЯХ СЖАТИЯ И СДВИГА

Артамонова Н.Б.<sup>1</sup>, Шешенин С.В.<sup>1</sup>, Чистяков П.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва  
[artamonovanb@mail.ru](mailto:artamonovanb@mail.ru)

Для моделирования упругопластического деформирования водонасыщенных песчаных грунтов под нагрузкой используются определяющие соотношения деформационного типа. Как известно [1], у пористых материалов наблюдается зависимость процессов сдвигового и объемного деформирования, зависимость кривых «интенсивность напряжений – интенсивность деформаций» и «объемное напряжение – объемная деформация» от вида напряженного состояния. В деформационной теории эти две функции должны быть универсальны для любого вида напряженного состояния. Для простых процессов [2] и для сложных процессов нужно проверять экспериментально, можно ли эти функции считать универсальными для любого вида напряженного состояния.

Цель исследования – определить материальные функции деформационной теории для песчаных грунтов на имеющемся в наличии экспериментальном оборудовании. Изложены методика и результаты экспериментального определения свойств песчаных грунтов на сжатие и сдвиг. Опыты проведены для двух типов песчаных грунтов кварцевого состава различной крупности на сборках комплекса АСИС для испытаний на многоплоскостной срез и компрессионное сжатие (ООО НПП «Геотек») на геологическом факультете МГУ. Исследована зависимость свойств песка от скорости деформации. В опытах на многоплоскостной срез деформации сдвига большие (до 35%), а объемные деформации малые (до 4%) и соизмеримы с объемными деформациями в опытах на сжатие песка. Таким образом, в модели нужно либо учитывать объемную деформацию, либо считать материал несжимаемым по сравнению с гораздо большими деформациями сдвига.

Предложена схема модифицированного опыта на сжатие песка в деформируемой металлической оболочке для определения коэффициента Пуассона. Опыты проведены в испытательной машине Zwick Z100 в НИИ механики МГУ. Обнаружено, что коэффициент поперечной деформации мало зависит от объемной деформации песка и выходит на константу с увеличением объемной деформации. Следовательно, в модели можно считать коэффициент поперечной деформации постоянной величиной для конкретного песчаного грунта и его состояния (сухого или водонасыщенного).

Следующую серию экспериментов предполагается провести на установке истинного трехосного сжатия в Институте проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН. Такие опыты упрощают получение материальных параметров, позволяют выявить влияние вида напряженного состояния и пути нагружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 25-21-00111.

### Литература

- [1] Ломакин Е.В. Определяющие соотношения деформационной теории для дилатирующих сред // Известия РАН. Механика твердого тела. – 1991. – № 6. – с. 66-75.  
[2] Ильюшин А.А. Пластичность, ч. 1. Упруго-пластические деформации. – М., Л.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ СТЕНКИ НА ОБРАЗОВАНИЕ МАГНИТНО-КОНВЕКТИВНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ**

<sup>1</sup>Балабаев Н.Е., <sup>1,2</sup> Лучинкин Н.А., <sup>1,2</sup>Беляев И.А.

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур, Москва,

<sup>2</sup>Московский энергетический институт, Москва

[nikita.balabaev@mail.ru](mailto:nikita.balabaev@mail.ru)

Потоки жидкого металла в каналах, на которые сильно влияют термогравитационная конвекция (ТГК) и магнитные поля, будут играть особенно важную роль в оболочках термоядерных реакторов. Ожидается, что такие компоненты станут частью внутренней конструкции реактора.

Текущая работа по изучению магнитогидродинамического (МГД) поведения потоков жидких металлов основана на лабораторных экспериментах и численном моделировании, выполненном для упрощенных конфигураций. Результаты таких исследований не дают полностью убедительных ответов, поскольку они не могут быть использованы в экстремальных условиях термоядерного реактора. Одним из таких условий является чрезвычайно сильное магнитное поле. Другим условием является высокий тепловой поток, создаваемый излучением плазмы и поглощением нейтронов, который варьируется от 4 до 20 МВт/м<sup>2</sup> в зависимости от расположения в системе, типа и размера реактора.

Совместное влияние магнитного поля и ТГК на МГД-теплопередачу в бланкете разнообразно и зависит не только от критериев Рейнольдса, Гартмана, Грасгофа и Рэлея, но и от относительной ориентации векторов скорости, индукции магнитного поля, плотности теплового потока и силы тяжести.

Следовательно, необходимость прогнозирования процессов теплопередачи в проектируемых термоядерных устройствах с магнитным удержанием требует расширения диапазона чисел Гартмана (Ha), доступных для исследований, в первую очередь за счет увеличения значения магнитной индукции в экспериментах.

Предстоящая научная работа направлена на решение задачи, связанной с изучением фундаментальных особенностей канальных МГД-течений электропроводящих жидкостей в сильных магнитных полях в режимах, характеризующихся экстремальными температурными градиентами и развитием магнитно-конвективных пульсаций (МКП) скорости и температуры большой амплитуды.

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния электропроводности стенки круглой трубы на формирование магнитно-конвективных пульсаций в вертикальном канале.

Рассмотрен восходящий поток ртути в круглых трубах с внутренним диаметром 40 мм и толщиной стенок 2,5 мм и 10 мм. Для улучшения электрического контакта между ртутью и стенками на внутренней поверхности труб было использовано меднение. Исследование гидродинамики и теплопередачи проводилось для случая равномерного нагрева стенок труб с использованием погружных микротермопарных зондов.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И АНАЛИЗ ФРАГМЕНТАЦИИ ПЕСЧАНИКА В УСЛОВИЯХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Банникова И.А., Уваров С.В., Банников М.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[malgacheva@icmm.ru](mailto:malgacheva@icmm.ru), [usv@icmm.ru](mailto:usv@icmm.ru), [mbannikov@icmm.ru](mailto:mbannikov@icmm.ru)

Выполнены испытания на квазистатическое сжатие цилиндрических образцов из песчаника (предоставлены НТЦ «Газпромнефть», Ботуобинский горизонт, глубина забора 2920...2950 м, за пределами месторождения разведывательной скважины, Россия) в режимах «нагрузка-разгрузка» и «без разгрузки» в условиях сохранения фрагментов. Нагружение реализовывалось на электромеханической универсальной испытательной машине Shimadzu AGX-Plus, с использованием видеоэкстензометра для точного определения деформационной кривой. Скорость движения нагружающей траверсы варьировалась (0,5; 0,1; 0,05 мм/мин). Испытания сопровождались записью данных сигналов акустической эмиссии (АЭ). Результат обработки экспериментальных данных показал, что модуль Юнга (на кривой разгрузки) намного превышал (почти в два раза) значения модуля деформации (на кривой сжатия), независимо от скорости сжатия. Регистрация импульсов энергии АЭ наблюдалась на каждом этапе «нагрузки-разгрузки», максимум значений импульсов АЭ достигался на этапах, близких к предразрушенному состоянию. На деформационных кривых при достижении максимальных напряжений происходил выход на «плато». Возможно, это связано с сохранением несущей способности песчаника за счет связующего материала (глины, воды). При этом наблюдается снижение «плато» при режиме «нагрузка-разгрузка». В работе анализировались фрагменты (до 99% от начальной массы) разрушенных образцов с использованием системы лабораторных сит и электронных весов (погрешность измерения до 0,0001 г). Количество фрагментов на нижних ситах с размером ячейки с 0,315Н до 0,063Н определялось методом обработки цифровых изображений [1-2]. Масса одного фрагмента на последних ситах оценивалась, как среднее значение по всем фрагментам данного сита (либо «пропорцией», если фрагментов было очень много). Полученные кумулятивные распределения фрагментов по массе  $N(m_f)$  для режима «нагрузка-разгрузка» имели более вытянутую в горизонтальном направлении область (и три наклона), чем те, что разрушались без разгрузки (и два или три наклона). Каждый наклон на кривых  $N(m_f)$  аппроксимирован соответствующей функцией (в основном, степенные с разными показателями). Показано, что в условиях «нагрузки-разгрузки» при той же скорости, что и «без разгрузки», и в случае увеличения скорости деформации, количество фрагментов уменьшается. Возможно, имеет место компактирование образцов за счет схлопывания трещин и пор. Похожее поведение наблюдалось при динамических испытаниях песчаника в ранних работах [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края, проект № 20-41-596013 и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. номер НИОКТР № 124020200116-1).

### Литература

- [1] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682940 РФ. Программа для определения статистических распределений размеров и массы фрагментов при разрушении материалов по данным оцифрованным оптическим изображений: № 2024682395: заявл. 01.10.2024; опублик. 01.10.2024 / И.А. Банникова, С.В. Уваров; заявитель ФГБУН ПФИЦ УрО РАН. – EDN OFMBXO.
- [2] Банникова И.А., Савельева Н.В. Исследование статистики фрагментации природных материалов в лабораторных условиях // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 4. – С. 18–38. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.2>.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАПОЛНЕННОГО МОЧЕВОГО ПУЗЫРЯ ЧЕЛОВЕКА

Барулина М.А.<sup>1</sup>, Тимкина Т.Д.<sup>1</sup>, Иванов Я.Н.<sup>1</sup>, Масляков В.В.<sup>2</sup>,  
Полиданов М.А.<sup>3</sup>, Волков К.А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный университет, Пермь

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского,  
Саратов

<sup>3</sup>Медицинский университет «Реавиз», Самара

<sup>4</sup>Частный университет «Реавиз», Санкт-Петербург

[woywy@mail.ru](mailto:woywy@mail.ru)

Повреждение мочевого пузыря обусловлено нарушением целостности стенки органа, которое, как правило, вызвано механическими повреждениями [1]. Механизм травмы зависит от различных факторов. Например, при тупом ударе в надлобковую область внутрипузырное давление резко повышается, что увеличивает нагрузку на стенку мочевого пузыря. Это может привести к разрыву органа вокруг наименее развитых мышц под воздействием гидродинамического эффекта [2-4]. При более слабом ударе могут возникнуть закрытые повреждения, такие как ушибы или кровоизлияния. Классификация травматических повреждений включает в себя степень тяжести, взаимосвязь с окружающей средой, расположение разрыва относительно брюшной полости и сопутствующие повреждения других органов. Понимание, как происходит деформация стенок мочевого пузыря в результате удара в область малого таза, позволяет прогнозировать возможные осложнения и выбрать оптимальное лечение пациента [5,6].

Были определены механические характеристики стенки мочевого пузыря. Создана конечно-элементная модель мочевого пузыря человека, учитывающая окружающие биоткани и органы. Показано, что линейно-упругая модель биологической ткани может быть использована для изучения деформированного состояния наполненного мочевого пузыря, если наполненный мочевой пузырь объемом 300 мл рассматривать как начальное недеформированное состояние. На основе построенной модели были проведены численные эксперименты. Для подтверждения полученных результатов была проведена серия экспериментов по влиянию внешнего давления на мочевой пузырь под ультразвуковым контролем. В будущем планируется использовать созданную модель для изучения разрыва мочевого пузыря под воздействием статических и динамических нагрузок.

### Литература

- [1] Voitenko A.N., Neymark A.I., Bondarenko A.V., Razdorskaya M.V., Hyperactive bladder syndrome as a consequence of pelvic ring injury // Polytrauma – 2013. – 2. – pp. 48–51.
- [2] Munarriz R.M., Yan Q.R., Znehra A., Udelson D., Goldstein I., Blunt trauma: The pathophysiology of hemodynamic injury leading to erectile dysfunction // Urol. – 1995. – 153. – pp. 1831–1840.
- [3] Aghajanyan V.V., Pronskikh A.A., Ustyantseva I.M., Agalaryan A.H., Kravtsov S.A., Krylov Y.M., Polytrauma // Nauka: Novosibirsk, Russia – 2003. – p. 492.
- [4] Sokolov V.A., Prevention and treatment of complications of polytrauma in the post-intensive care period // Bull. Traumatol. Orthop. Named After N.N. Priorov. – 2002. – 1. – pp. 78–84.
- [5] Baker S.P.; O'Neill B.; Haddon W., Jr.; Long W.B., The Injury Severity Score: A method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care // J. Trauma. – 1974. – 14. – pp. 187–196.
- [6] Kraljević L., Trauma and multiple trauma as one of the major problems of contemporary medicine and society // Lijec. Vjesn. – 1977. – 99. – pp. 507–510.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЫСТРОЙ ДИФФУЗИИ

Баяндин Ю.В.

*Институт механики сплошных сред, Пермь*

[buv@icmm.ru](mailto:buv@icmm.ru)

Связанные нестационарные постановки задач термоупругости возникают во многих областях науки и техники. Аналитические решения для сред с нелинейными теплофизическими свойствами получены только при существенных допущениях, в том числе при понижении размерности задачи, поэтому для прикладных задач необходимо применение численных методов. Разработка численного аналога математической модели, в том числе с применением пакетов прикладных программ, требует процедур проверки достоверности, в частности верификации и валидации. Под верификацией обычно понимается проверка корректности гипотез и формулировки математической постановки, задания начальных и граничных условий, выбора схемы дискретизации и метода численного решения, учет источников ошибок и погрешностей. Сравнение результата численного моделирования производится с проверенными известными моделями (эталонными моделями). В настоящей работе для задачи термоупругости верификация проводилась с использованием классической формулы Томпсона для изменения температуры при упругом деформировании твердого тела. Валидация численного решения опирается на сравнении с достоверными экспериментальными данными или известными аналитическими решениями. Целью работы является верификация и валидация численного решения нестационарной задачи термоупругости графита с нелинейными свойствами [1]. Использовался метод конечных элементов в пакете прикладных программ Comsol Multiphysics. Сравнение численного решения и аналитического решения проводилось для квазилинейного уравнения теплопроводности со степенной зависимостью  $ut = \Delta u m / m$  [2], также известного как уравнение быстрой диффузии [3]. При предельном переходе  $m \rightarrow 0$  уравнение превращается в уравнение  $ut = \Delta \ln u$ , для которого допустимо аналитическое решение в форме бегущей волны [4,5]. На рисунке 1 приведены профили температуры в различные моменты времени для численного и аналитического решений.

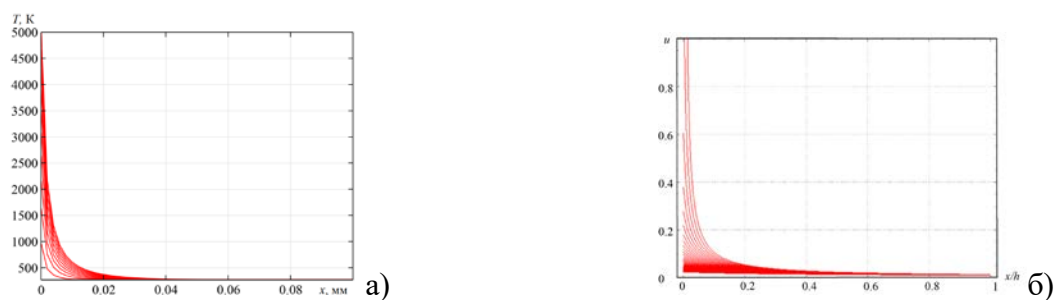


Рисунок 1 – Численное (а) и аналитическое (б) решение нестационарной нелинейной задачи теплопроводности в различные моменты времени

### Литература

- [1] Станкус С.В., Савченко И.В., Агажанов А.Ш., Яцук О.С., Жмуриков Е.И. Теплофизические свойства графита МПГ-6 // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, выпуск 2. – С. 205-209.
- [2] Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. – М.: Наука. – 1987. – 480 с.
- [3] Косов А.А., Семенов Э.И. Новые точные решения уравнения диффузии со степенной нелинейностью // Сибирский математический журнал. – 2022. – Т. 63, №. 6. – С. 1290-1307.
- [4] Аристов С.Н. Периодические и локализованные точные решения уравнения  $h_t = \Delta \ln h$  // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40, №. 1. – С. 22-26.
- [5] Popovych R.O., Vaneeva O.O., Ivanova N.M. Potential nonclassical symmetries and solutions of fast diffusion equation // Physics Letters A. – 2007. – Т. 362, №. 2-3. – С. 166-173.

## МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ВОДОРОДА В ЭКСТРУДЕРЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Беляев А.К.<sup>1</sup>, Полянский В.А.<sup>1</sup>, Седова Ю.С.<sup>1</sup>, Дегилевич Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург*  
[vice.ipme@gmail.com](mailto:vice.ipme@gmail.com), [vapol@mail.ru](mailto:vapol@mail.ru), [sedova.yus@mail.ru](mailto:sedova.yus@mail.ru), [degilevichegor@gmail.com](mailto:degilevichegor@gmail.com)

Стандартный способ экструзии водорода как термоядерного топлива заключается в том, что внутри экструдера замораживается твердый водород, который затем выдавливается из него поршнем сквозь экструзионную головку. Недостатком этого способа является то, что заполнение экструдера новой порцией топлива с последующим охлаждением требует времени. Поэтому предпочтение отдается инженерным системам непрерывного формирования и инжекции твердого водорода в плазму. При этом твердое топливо выдавливается из экструдера под действием давления свежего топлива в газовой или жидкой фазе, которое охлаждается и затвердевает при подходе к экструзионной головке, обеспечивая непрерывный режим.

Было проведено аналитическое, прямое численное и имитационное моделирование.

Для этого стационарное уравнение теплопроводности с учетом течения вещества с постоянной скоростью по всему сечению внутри цилиндрической части экструдера было решено методом Гринберга, что рассматривается как первое приближение. Изменение физических величин при изменении поля температуры, фазы вещества, сложный профиль скорости учтены применением численных процедур, в частности методом конечных разностей. Описание течения водорода в цилиндрической части экструдера проводится с помощью реологической модели вязкопластического материала Бингама. Поскольку смена фазы вещества происходит не моментально, необходимо произвести учет эффектов в процессе кристаллизации. Во время кристаллизации температура вещества в идеализированных случаях должна оставаться равной температуре кристаллизации и не уменьшаться до тех пор, пока жидкая фаза не перейдет в твердую. При этом можно считать параметр теплоемкости достаточно большим, но необходимо ввести в рассмотрение теплоемкость при кристаллизации, что позволяет провести моделирование фронта кристаллизации.

Валидация предложенного способа описания непрерывной экструзии термоядерного топлива в беспоршневом экструдере осуществляется с помощью имитационного моделирования. Для этого была разработана специальная конечно-объемная модель. Разработка конечно-объемной модели экструзии твердого водорода осуществлялась в модуле Fluent программной среды ANSYS. Решение поставленной задачи осуществлялось последовательно путем решения тестовых задач, их усложнения и модификации с постепенным приближением к моделированию конечного исследуемого процесса. Последовательно было выполнено моделирование ламинарного изотермического течения ньютоновской жидкости в канале круглого сечения, моделирование изотермического течения вязкопластического тела Бингама в канале круглого сечения, моделирование изотермического течения вязкопластического твердого водорода при экструзии в канале круглого сечения. Наконец, было учтено распределение температуры на всех стадиях производства в инжекторе твердого водорода из жидкого.

Проведено сравнение результатов численного моделирования зависимости скорости экструзии водорода от температуры при различном уровне давления на входе экструдера с опубликованными в литературе теоретическими зависимостями.



## **ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОГО ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВСЛЕДСТВИЕ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ НАЛИЧИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА**

Беляев А.Ю.<sup>1</sup>, Свистков А.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
belyaev@icmm.ru*

Существуют различные способы модификации поверхности и приповерхностного слоя материалов. Модифицированные материалы находят применение в различных областях - от техники до медицины. В связи с этим понимание процессов, происходящих при том или ином способе модификации, важно для корректного прогнозирования свойств получаемого материала.

Особые физико-механические свойства модифицированного слоя открывают возможность использования обработанных таким образом полимеров в медицинских целях. Слой обладает достаточно высокой жесткостью по сравнению с исходным материалом. Кроме того, поверхность обработанного материала приобретает волнообразную форму. Трещиностойкость и шероховатость поверхностного слоя определяются его рельефом. Таким образом, понимание механизма формирования рельефа позволит выбрать подходящий режим обработки, соответствующий требуемым физико-механическим свойствам слоя.

Вопрос о природе возникновения волн поднимался в других работах, однако объяснения даны в виде неподтвержденных расчетами или экспериментами гипотез. При этом некоторые из них не проходят простейшей численной проверки. В данной работе высказана новая гипотеза, представлена математическая модель, описывающая процесс образования слоя и расчеты, на основании которых сделаны выводы о состоятельности выдвинутых гипотез.

Предложен новый вариант анализа поведения упругого слоя с равномерно распределенными электрическими зарядами. С помощью специального слагаемого в уравнении, записанном на основе начал термодинамики, предлагается учитывать работу, совершаемую при деформации слоя электрическими зарядами. В статье получены определяющие уравнения на основании законов термодинамики. Показано, что тензор напряжений Коши представляет собой сумму двух членов. Первый член определяет напряжения, возникающие при взаимодействии зарядов.

Рассмотрено применение теории к моделированию процессов при ионно-плазменной обработке полимерных материалов. Целью рассматриваемого примера является анализ гипотезы о том, что появление волнистого рельефа возникшего карбонизированного слоя на поверхности полимерного материала может быть связано с напряжениями, возникающими из-за того, что заряды пытаются деформировать материал при отталкивании. Предложена методика оценки напряжений, возникающих в результате описанного процесса. Проведен расчет, который показал, что гипотеза проходит численную проверку. Проведен сравнительный анализ характеристик рельефа, полученных расчетным путем по предложенной модели, и рельефа, полученного методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) полиуретанов, обработанных плазмой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № АААА-А20-120022590044-7.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУР РАБОЧЕГО ЦИКЛА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА С СИЛОВЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ СПЛАВА НИКЕЛИДА ТИТАНА

Беляев Ф.С.<sup>1,2</sup>, Горбаченко Д.Ф.<sup>1,2</sup>, Евард М.Е.<sup>2</sup>, Волков А.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

*belyaev\_fs@mail.ru, daniilgorbachenko@gmail.com*

Термомеханические приводы на основе сплавов с памятью формы (СПФ) в настоящее время всё шире применяются в различных отраслях техники. Одним из основных источников интереса к таким приводам являются жесткие требования к весу изделия в современных летательных аппаратах, космических аппаратах, различных робототехнических комплексах. Приводы на основе СПФ позволяют добиться значительного выигрыша в весе по сравнению с аналогичными электроприводами и гидравлическими приводами. Кроме того, приводы на основе СПФ обладают высокой надежностью, высокими показателями развиваемых усилий, бесшумностью работы, простотой конструкции и малым количеством подвижных частей. При этом СПФ одинаково хорошо могут быть применены как в больших, развивающих значительные усилия, приводах так и микроприводах.

В работе исследовалась работа торсионного привода с рабочим телом из сплава TiNi и упругим контртелом. Подготовка рабочего тела осуществлялась деформированием в мартенситном состоянии до 7% с последующей разгрузкой. Рабочий цикл состоял из этапов срабатывания и взведения. На этапе срабатывания рабочее тело нагревается и за счет эффекта памяти формы восстанавливает запасенную при подготовке деформацию, но за счет наличия упругого контртела в нем возникают внутренние напряжения. На этапе взведения рабочее тело охлаждается под действием внутренних напряжений, за счет чего оно снова накапливает деформацию. Таким образом, работа привода основана на накоплении и восстановлении фазовой деформации, связанной с мартенситными превращениями в сплаве. Полнота протекания фазовых превращений определяется температурами нагрева и охлаждения в рабочем цикле привода. Целью данного исследования было определение влияния температур рабочего цикла на работоспособность привода и на стабильность функциональных свойств его рабочего элемента. Для численного описания механического поведения рабочего тела применялась ранее разработанная микроструктурная модель СПФ, способная описывать все основные деформационные эффекты в этих сплавах.

Расчеты показали, что с увеличением температуры нагрева в рабочем цикле растет производимая приводом полезная работа. Предел этого роста определяется температурой, которая в заданных условиях соответствует концу обратного превращения. Аналогично снижение температуры охлаждения до температуры, соответствующей концу прямого превращения, повышает работоспособность привода. Однако сильное повышение температуры нагрева приводит к развитию в рабочем элементе высоких напряжений, из-за чего в нем возникает необратимая пластическая деформация. Накопление необратимой деформации приводит к изменению характеристических температур мартенситных превращений, снижению величины восстанавливаемой деформации и развиваемых усилий, что негативно сказывается на работоспособности привода при последующих срабатываниях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00361, <https://rscf.ru/project/25-21-00361/>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

Беляева А.В.<sup>1,2</sup>, Сухановский А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

[bav@icmm.ru](mailto:bav@icmm.ru), [san@icmm.ru](mailto:san@icmm.ru)

Урбанизация является глобальной тенденцией последнего столетия. Увеличение доли городского населения неизбежно приводит к расширению границ городов и последующему формированию мегаполисов. Известно, что температура в пределах города может существенно отличаться от близлежащих областей [1-2]. Связано это в основном с антропогенной модификацией окружающей среды в городских условиях (увеличение тепловой емкости наряду со снижением средней скорости ветра и влажности). Поэтому сегодня одной из важнейших задач является обеспечение комфортного теплового режима на территории города.

В данной работе представлены результаты лабораторного моделирования процессов теплообмена в условиях городской геометрии. Ранее такой подход применялся для решения ряда задач городской климатологии [3-5]. В качестве экспериментальных моделей использованы трехмерные макеты городов Перми и Красноярска. Модели изготовлены на 3D принтере в масштабе 1:4000 и воспроизводят с высокой точностью рельеф местности, а также высоту и расположение зданий на территории площадью около 6 км<sup>2</sup>. Для оценки управляющих параметров использовались турбулентные коэффициенты переноса, характерные для пограничного слоя атмосферы. Исследован процесс охлаждения поверхности моделей городов после длительного нагрева инфракрасным излучением. Показано, что для Перми с относительно плоским рельефом геометрия города играет существенную роль в распределении температуры. Однако для Красноярска с высокой неоднородностью рельефа этого не наблюдается, что может быть следствием сильного влияния рельефа на процесс теплообмена.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-61-00098

### Литература

- [1] Kim S. W., Brown R. D. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review //Science of the Total Environment. – 2021. – Т. 779. – С. 146389.
- [2] Liu Z. et al. Taxonomy of seasonal and diurnal clear-sky climatology of surface urban heat island dynamics across global cities //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2022. – Т. 187. – С. 14-33.
- [3] Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area //Urban Climate, – 2022. – V. 43, P.101177
- [4] Евграфова, А., Сухановский, А. Конвективный перенос условной примеси в пределах городской геометрии // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 2. С.14–21.
- [5] Беляева А. В., Сухановский А. Н. Лабораторное моделирование в задачах промышленной безопасности // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. № 4. С.14–21.

## ИССЛЕДОВАНИЕ САМОДИФФУЗИИ АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Беляева Т.Д.<sup>1</sup>, Новак Е.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Специализированный учебно-научный центр Уральского федерального университета,  
Екатеринбург*

<sup>2</sup> *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург*

[tatiana.mizgireva@urfu.ru](mailto:tatiana.mizgireva@urfu.ru), [ekaterina.novak@urfu.ru](mailto:ekaterina.novak@urfu.ru)

В природе известны разнообразные механизмы преобразования химической энергии в кинетическую. Например, частица Януса, которая является искусственно синтезированной, использует химические реакции для преобразования энергии. Поверхность данной частицы разделена на две части с разными физическими и химическими свойствами. Для достижения направленного движения при включении магнитного поля можно нанести на часть поверхности активное вещество. Таким образом, можно получить управляемую активную частицу [1], перспективную для применения в медицинских технологиях, включая доставку лекарств к пораженным внутренним органам.

В данной работе с помощью серий компьютерных экспериментов методом молекулярной динамики была смоделирована суспензия магнитных наночастиц типа «малина» с использованием пакета ESPResSO [2] на языке программирования Python. Представление магнитных наночастиц в виде «малины», где каждая наночастица моделируется как структура из нескольких субчастиц, необходимо для точного моделирования поступательной, а также вращательной диффузии. Таким образом, «малине» можно придать требуемую поверхность и форму, которые критически важны для правильного учета гидродинамических взаимодействий. В данной работе все внутренние и поверхностные частицы были зафиксированы относительно центральной, которой был задан дипольный момент. Далее на поверхности частицы было расположено желаемое число наномоторов, задающих скорость в указанном направлении.

В результате работы была исследована зависимость потока в заданном направлении для суспензии активных эллипсоидов от интенсивности внешнего магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке РФФ № 25-22-00327.

### Литература

[1] Glenn C. Vidal-Urquiza and Ubaldo M. Córdoba-Figueroa. Dynamics of a magnetic active Brownian particle under a uniform magnetic field // Phys. Rev. E – 2017. – 96(5-1): 052607

[2] Weik F. et al. ESPResSo 4.0—an extensible software package for simulating soft matter systems //The European Physical Journal Special Topics. – 2019. – Т. 227. – №. 14. – С. 1789-1816.

## **КОЛЕБАНИЯ ЧАСТИЦ В МАГНИТОАКТИВНОМ ЭЛАСТОМЕРЕ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПЕРЕМЕННЫМ ПОЛЕМ: ВЛИЯНИЕ МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА**

Биллер А.М., Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
kam@icmm.ru, sov@icmm.ru, raikher@icmm.ru*

Магнитоактивные эластомеры (МАЭ) привлекают интерес исследователей возможностью бесконтактно, посредством приложенного магнитного поля, управлять напряжённо-деформированным состоянием, формой и диссипативными характеристиками образцов материала в режиме реального времени. В основе такого макроскопического поведения лежат сложные взаимодействия, в которых находятся между собой компоненты композита: микронные частицы ферромагнетика и мягкая эластомерная матрица. Для создания устройств с МАЭ в качестве рабочих элементов необходимо хорошо понимать механизмы, управляющие внутренней структурой материала. Разобраться в них позволяет моделирование процессов, протекающих в этих композитах на мезоскопическом уровне (см., например, [1]).

В настоящей работе построена базовая модель мезоскопической динамики МАЭ, где в качестве элементарной ячейки материала выбрана пара сферических линейно намагничивающихся частиц, погружённых в упруговязкий эластомер. Система помещается в магнитное поле, состоящее из постоянной и переменной компонент. В зависимости от набора материальных параметров системы и характеристик поля вынужденные колебания пары могут принимать вид различных стационарных циклов. Модель учитывает способность вязкоупругой эластомерной матрицы испытывать большие деформации и делает возможным описание сближения частиц вплоть до их плотного контакта. Таким образом, она позволяет моделировать особенное поведение, выражающееся в резком переходе (коллапсе) от конечного расстояния между частицами к плотному контакту. В статике такое поведение описывается как бистабильность и проявляется в виде магнитомеханического гистерезиса: деформация как функция приложенного поля имеет область двужначности [2]. Присутствие или отсутствие гистерезиса в установившихся колебаниях системы является результатом взаимного влияния управляющих параметров: амплитуды и частоты магнитного поля.

Рассеяние энергии, сопровождающее вынужденные колебания пары частиц также рассмотрено в работе. Обнаружено, что магнитомеханический гистерезис может служить эффективным регулятором мощности поглощения; например, в определённом диапазоне амплитуд переменного поля он вызывает резкое снижение поглощения в ответ на рост частоты.

### Литература

- [1] Puljiz M., Huang S., Kalina K.A., Nowak J., Odenbach S., Kästner M., Auernhammer G.K., Menzel A.M. Reversible magnetomechanical collapse: virtual touching and detachment of rigid inclusions in a soft elastic matrix // *Soft Matter*. – 2018. – V. 14. – P. 6809–6821.
- [2] Biller A.M., Stolbov O.V., Raikher Y.L. Modeling of particle interactions in magnetorheological elastomers // *Journal of Applied Physics*. 2014. V. 116. Art. no. 114904.

## АНАЛИЗ ВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Богданова А.П., Каменских А.А., Носов Ю.О.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[anstasia\\_pankova@mail.ru](mailto:anstasia_pankova@mail.ru), [anna\\_kamenskih@mail.ru](mailto:anna_kamenskih@mail.ru), [ura.4132@ayndex.ru](mailto:ura.4132@ayndex.ru)

Подшипники скольжения широко применяются в строительной и мостостроительной деятельности [1]. Это контактные узлы с большим числом поверхностей скольжения. Слои скольжения могут изготавливаться из полимерных или композитных антифрикционных материалов, которые необходимо моделировать с учетом нелинейного поведения: пластичность, ползучесть, вязкоупругость или вязкоупругопластичность. Выбор моделей поведения материалов зависит от явлений, наблюдаемых при экспериментальных исследованиях, в том числе при сложном деформировании образцов.

Первичный анализ поведения материалов, можно выполнить в рамках анализа тестовых задач близких к классической задаче Герца о контакте стального сферического индентора и полупространства. Слой скольжения моделируется как вязкоупругое тело с помощью уравнений максвелловского типа с использованием рядов Прони [2]. Численное моделирование деформационного поведения осуществляется в двух режимах: статическое; циклическое. При статическом виде нагружения подразумевается итерационное прикладывание нагрузки 1000 Н к поверхности стального индентора (стандартными средствами моделирования пакета ANSYS) и последующей её выдержкой в течение 60 сек. При циклическом нагружении моделируется итерационное наращивание нагрузки до 1000 Н к поверхности стального индентора на первом шаге, далее каждую секунду варьируем нагрузку  $F$  и  $F/2$  в течение 60 секунд. Вязкоупругая модель поведения материала первоначально была верифицирована на модифицированном фторопласте [3]. Далее было выполнено моделирование поведения набора из 6 современных полимерных и композиционных материалов разных производителей. Чистый фторопласт или политетрафторэтилен (ПТФЭ) был выбран как контрольный образец. Модели вязкоупругого поведения материалов построены на основе данных натуральных экспериментов, выполненных на базе ИМСС УрО РАН и лаборатории пластмасс ПНИПУ.

Установлено, что характер распределения контактного давления для обоих вариантов нагружения имеет малые отличия. При этом максимальные значения меньше при циклическом нагружении, оно изменяется в пределах от 16 до 22 % для всех рассмотренных материалов антифрикционного полупространства, что связано с релаксацией.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00638, <https://rscf.ru/project/25-29-00638/>

### Литература

- [1] Адамов А.А., Каменских А.А., Струкова В.И. О влиянии геометрии и конфигурации сферического слоя скольжения опорных частей мостов на работоспособность конструкции // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 289-299. <https://doi.org/https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.3.24>
- [2] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618695 Российская Федерация. Идентификация математической модели вязкоупругого поведения тела Максвелла на основе рядов Прони: № 2023617843: заявл. 27.04.2023; опублик. 27.04.2023 / А.А. Каменских, Ю.О. Носов.
- [3] Kamenskikh A. A., Nosov Y. O., Bogdanova A.P., The Study Influence Analysis of the Mathematical Model Choice for Describing Polymer Behavior // Polymers. – 2023. – Vol. 15. – Art. 3630. <https://doi.org/10.3390/polym15173630>

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ВЯЗКОУПРУГИХ И ВЯЗКОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Богданова А.П., Каменских А.А., Носов Ю.О.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[anstasia\\_pankova@mail.ru](mailto:anstasia_pankova@mail.ru), [anna\\_kamenskih@mail.ru](mailto:anna_kamenskih@mail.ru), [ura.4132@ayndex.ru](mailto:ura.4132@ayndex.ru)

Транспортно-логические системы являются одним из приоритетных направлений развития Российской Федерации [1]. Стратегически важным элементом таких систем являются мостовые сооружения [2], которые обеспечивают связанность территорий. Несущим элементом мостов и эстакад является опорная часть [2], которая воспринимает нагрузки от пролетного строения и окружающей среды, в том числе температурные и сейсмические, и перераспределяет их на неподвижную опору. Основные требования к элементам конструкции мостового сооружения: длительная безремонтная работа, которая составляет от 15 до 30 лет, в зависимости от загруженности; выполнение возложенных функций, в том числе при сложных или экстремальных условиях работы; безопасность субъектов и объектов транспортной отрасли и т.д. Работа опорных частей пролетного строения напрямую зависит от деформационного поведения материалов относительно тонких слоев скольжения, работающих в сложных условиях в рамках механики контактного взаимодействия. К таким материалам относятся антифрикционные полимеры и композиты, а также смазки, используемые для создания слоев скольжения разной геометрической конфигурации. Для качественного предсказания отклика системы на разный уровень и тип воздействий, особенно в длительные периоды времени, требуется математическое описание физико-механических, реологических и фрикционных свойств материалов. В рамках работы рассмотрено описание математических моделей поведения материалов, применяемых в мостостроительной деятельности: смазочный материал ЦИАТИМ-221 и ЦИАТИМ-221F; модифицированный фторопласт АРФЛОН АR-200. Для описания смазочных материалов использовалась расширенная вязкоупругопластическая модель Ананд с учетом зависимости от температуры ряда материальных констант, для описания поведения антифрикционного материала – вязкоупругая модель максвелловского типа, описанная с использованием рядов Прони. Так как в настоящий момент остро стоит вопрос, связанный с созданием отечественных конструкций сейсмостойких опорных частей мостов, то интерес представляет поведение материалов при циклических нагрузках. В рамках задачи рассмотрено деформирование элементарного объема антифрикционного материала слоя скольжения при циклическом воздействии с учетом и без учета затухания. Также было рассмотрено поведение части плоского слоя скольжения опорной части с одним углублением под смазочный материал при циклической нагрузке, при фрикционном контакте с полированной стальной плитой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00470, <https://rscf.ru/project/25-29-00470/>

### Литература

- [1] Адамов А.А., Каменских А.А., Струкова В.И. О влиянии геометрии и конфигурации сферического слоя скольжения опорных частей мостов на работоспособность конструкции // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 289-299. – <https://doi.org/https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.3.24>
- [2] Bogdanova A.P., Kamenskikh A.A., Nosov Y.O. The Geometric Configuration of Lubricant Recesses of the Polymer Sliding Layer of the Bearing // Designs. – 2023. – Vol. 7. – Art. 144. – <https://doi.org/10.3390/designs7060144>

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ ВЫПЛАВЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Богданова Н.А.<sup>1</sup>, Жилин С.Г.<sup>1</sup>, Предеин В.В.<sup>1</sup>, Фирсов С.В.<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> *Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре*  
[joyful289@inbox.ru](mailto:joyful289@inbox.ru)

В современном машиностроении литьем по выплавляемым моделям удается получать заготовки практически неограниченной пространственной конфигурации с качеством поверхности, иногда, приближенным к конечным изделиям. Необходимость совершенствования процессов формирования литых заготовок повышенной размерно-геометрической точности направлено на расширение номенклатуры материалов применяемых на промежуточных стадиях, а также определяет актуальность поиска альтернативы традиционным операциям ЛВМ. Перспектива решения проблем видится в применении процессов прессования порошков воскообразных материалов, что позволяет формировать рассредоточенную пористость в структуре таких прессовок, не оказывающих разрушающего воздействия на керамику при их нагреве [1]. В отличие от традиционных методов формирования выплавляемых моделей применение экспериментального варианта не допускает образование теплофизических дефектов. Важным при образовании поверхности экспериментальных выплавляемых моделей сложной геометрии является обеспечение расчетных значений плотности участков различной толщины в прессовках, посредством регулирования скорости перемещения прессующих элементов и значений нагрузки во всем объеме уплотняемого материала, а также времени выдержки прессовки в нагруженном состоянии для устранения эффекта упругого возврата материала. Отмеченные параметры процесса уплотнения определяют итоговую геометрию прессовок [2, 3]. Направленность нагружения воскообразного материала при формировании из него прессовок, выполненных в виде тел вращения, возможно обеспечить его уплотнением в поле действия центробежных сил [4]. В ходе эксперимента регулировали параметры процесса уплотнения воскообразных порошковых модельных материалов, определяющих силовое воздействие на них центробежного поля: скорость вращения жесткой пресс-матрицы, плотность материалов и расстояние от центра вращения до поверхности прессовки. В качестве порошковых материалов использованы Т1 и ПС50/50. В качестве уплотняющих материалов, позволяющих снизить скорость вращения пресс-матрицы, использованы шарики из Ст45. Сопоставлением расчетных и экспериментальных данных удалось определить варианты повышения эффективности прессования воскообразных порошковых материалов в поле действия центробежных сил.

\*Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН

### Литература

- [1] Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Исследование процессов формирования пористых выплавляемых моделей, применяемых для изготовления высокоточного литья// Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2023. Т.29. №3. – С.54-66.
- [2] A.A. Adamov, I.E. Keller, S.G. Zhilin, and N.A. Bogdanova Identification of the Cap Model of Elastoplasticity of Non-Compact Media Under Compressive Mean Stress// Mechanics of Solids. – 20024, Vol.59, N.4. – 1868-1880
- [3] Богданова Н.А., Жилин С.Г. Влияние режимов уплотнения воскообразных порошков на напряженно-деформированное состояние прессовок, применяемых в точном литье// Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2024. Т.67. №5. – С.593-603.
- [4] Жилин С.Г., Богданова Н.А., Фирсов С.В., Комаров О.Н. Перспективы метода получения удаляемых моделей прессованием воскообразных материалов в поле действия центробежных сил// Металлург. – 2023. №6. – С.75-84.



## ПОГЛОЩЕНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЭМУЛЬСИЯМИ

Боженко С.А.<sup>1</sup>, Туркин С.Д., Закинян А.Р.

<sup>1</sup>Северо – Кавказский федеральный университет, Ставрополь

[s.semyonovaa@yandex.ru](mailto:s.semyonovaa@yandex.ru), [turkinsd@gmail.com](mailto:turkinsd@gmail.com), [zakinyan.a.r@mail.ru](mailto:zakinyan.a.r@mail.ru)

Исследование функциональных материалов, поглощающих, в высокой степени, электромагнитное излучение в диапазоне сверхвысоких частот, позволяет выявить новые фундаментальные закономерности в области физики конденсированного состояния [1]. К таким материалам можно отнести, например, магнитодиэлектрическую эмульсию типа «вода в масле», ключевым компонентом которой является вода. Наличие водных капель в объеме дисперсной среды позволяет добиться высокой эффективности поглощения электромагнитного излучения. При этом управляемость микрогеометрией эмульсии посредством воздействия внешнего магнитного поля приводит к дополнительному поглощению за счет образования цепочечных структур из отдельных капель.

В настоящей работе исследуется зависимость коэффициента поглощения от частоты электромагнитного излучения. Экспериментальная методика основана на векторном анализе волноводных линий передач, представляющих собой прямоугольный волновод с частичным заполнением исследуемым материалом. Внешнее магнитное поле перпендикулярно широкой стенки волновода. Эксперимент показал, воздействие магнитного поля приводит к образованию структур из водных капель, что как следствие, повышает поглощательную способность материала на всем исследуемом спектре частот. В сопоставление экспериментальным зависимостям, представлены теоретические расчеты (рис. 1), полученные различными методами. Выбор крайних полей – 13.5 кА/м и 0 кА/м обусловлен невозможностью определения зависимости числа капель от напряженности внешнего магнитного поля. Поэтому, сравнивается эксперимент при отсутствии магнитного поля – с теоретическим расчетом для одной капли и эксперимент при максимальной напряженности – с теоретическим расчетом для 40 капель в цепочке.

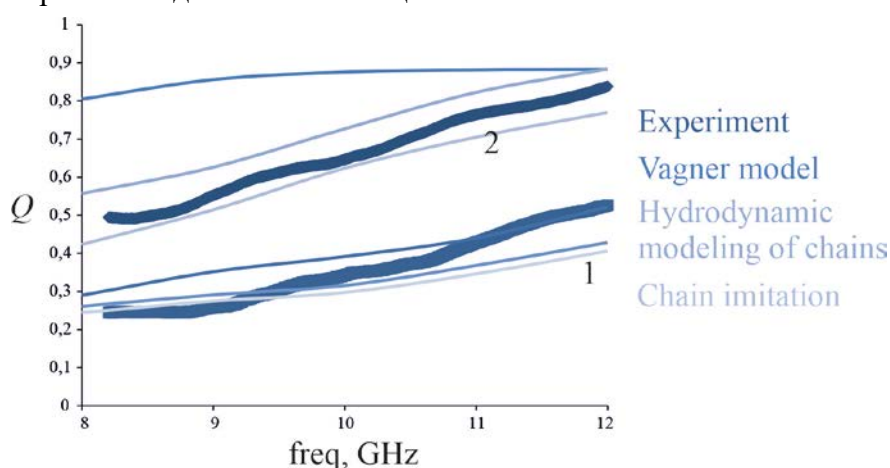


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения от частоты электромагнитного излучения. Кривые 1 – 0 кА/м (одиночные капли); кривые 2 – 13.5 кА/м (40 капель в цепочках). Объемная концентрация капель в эмульсии – 30 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Turkin S., Zakinyan A., Bozhenko S. Absorption spectrum of magnetically structured emulsions in the centimeter range. *Physica Scripta*. – 2024. – Vol. 99. – P. 14.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В Т-ОБРАЗНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ АЗИМУТАЛЬНОЙ СИЛЫ

Бондаренко А.А.<sup>1,2</sup>, Колесниченко И.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

[bondarenko.a@icmm.ru](mailto:bondarenko.a@icmm.ru), [kiv@icmm.ru](mailto:kiv@icmm.ru)

Генерация закрученных течений жидкого металла с помощью бесконтактного воздействия вращающимися магнитными полями продолжительное время применяется в литейных технологических процессах. Закрученные потоки встречаются, например, в центробежных насосах, участках трубопроводов за диверторами и в перемешивателях. В частности, для нужд литейной промышленности хорошо зарекомендовали себя магнитогидродинамические (МГД) перемешиватели. В них интенсивные течения электропроводной среды создаются под воздействием бегущих и/или вращающихся магнитных полей. Такие аппараты применяются для улучшения качества изготавливаемых сплавов. Актуальными остаются задача локального воздействия вращающимся магнитным полем на рабочее тело и исследование области распространения закрученного потока, так как зачастую на производстве не удается разместить МГД-перемешиватель вокруг всей емкости с жидким металлом.

Заметим, что только вращающийся металл создает слабо развитое полоидальное течение, которое можно усилить добавлением бегущего магнитного поля [1]. Для генерации течений с наиболее развитыми полоидальной и тороидальной компонентами скорости лучше всего подходит индуктор с чередующимися по вертикали направлениями вращающегося магнитного поля [2]. Такое перемешивание также необходимо в разрабатываемых жидкометаллических накопителях энергии с локализованным подводом тока из-за существования интервала значений внешнего магнитного поля, при воздействии которого интенсивность полоидального перемешивающего течения существенно снижается [3].

В данной работе численно исследуется ламинарное закрученное течение жидкого металла в составной цилиндрической ячейке с Т-образным сечением под действием азимутальной силы. Система уравнений Навье-Стокса для случая осевой симметрии записана в терминах «функция тока – завихренность», при этом функция тока вводится для определения радиальной и аксиальной компонент скорости. Итоговая система состоит из трех уравнений для определения азимутальной скорости, завихренности и функции тока и решается методом конечных разностей. Для интегрирования уравнений используется явная двухслойная схема, при этом уравнение для функции тока решается методом последовательной верхней релаксации на каждом временном шаге. Для постановки граничных условий используется метод Грязнова-Полежаева [4]. В ходе работы получены поля скорости и завихренности как для закручивания потоков в одном направлении, так и в противоположных.

### Литература

- [1] Stiller J., Koal K., Nagel W., Pal J., Cramer A. Liquid metal flows driven by rotating and traveling magnetic fields // Eur. Phys. J. Spec. Top. — 2013. — т. 220. — с. 111–122.
- [2] Kolesnichenko I., Okatev R. Equalisation the toroidal and poloidal kinetic energies of liquid metal stirring flow // Eur. Phys. J. Plus. — 2024. — т. 139. — с. 846.
- [3] Kolesnichenko I., Frick P., Eltishchev V., Mandrykin S., Stefani F. Evolution of a strong electrovortex flow in a cylindrical cell // Phys. Rev. Fluid. — 2020. — с. 123703.
- [4] Полежаев В.И., Грязнов В.Л. Метод расчета граничных условий для уравнений Навье-Стокса в переменных “вихрь, функция тока” // Докл. АН СССР. — 1974. — т. 219, № 2. — с. 301–304.

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ П-ОБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОНДУКЦИОННОГО НАСОСА НА МОМЕНТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ**

Бондаренко А.А.<sup>1,2</sup>, Колесниченко И.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

<sup>2</sup>*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[bondarenko.a@icmm.ru](mailto:bondarenko.a@icmm.ru), [kiv@icmm.ru](mailto:kiv@icmm.ru)

Принцип применения электромагнитной силы для транспортировки жидких металлов реализован в электромагнитном насосе – устройстве, в котором отсутствуют движущиеся части. Электромагнитные насосы применяются в металлургической и атомной промышленности, множество конфигураций изучено теоретически и экспериментально [1]. Однако задача проектирования недорогих и надежных электромагнитных насосов по-прежнему остается актуальной.

В настоящей работе рассматривается частный случай кондукционного механизма генерации электромагнитной силы, в котором канал проектируется как виток вторичной обмотки трансформатора. Данная работа продолжает цикл исследований способа создания электромагнитных сил с использованием ферромагнитных П-образных сердечников [2]. Изучаемая конфигурация может быть отождествлена с парой сил, приложенных к дисковому каналу. Момент этой пары сил создает интенсивное одновихревое течение в канале, который имеет форму диска [3].

Первичная обмотка трансформатора вынесена из высокотемпературной зоны и не нуждается в дополнительном охлаждении. В связи с этим насосы подобной конфигурации способны работать при высоких температурах и полноценно функционировать при погружении в тигель с жидким металлом.

Данная работа посвящена исследованию влияния геометрических характеристик П-образных сердечников на величину вращательного момента электромагнитных сил в канале насоса описанной конфигурации. Характерными параметрами задачи являются длина сердечников, их расстояние до центра канала и угол скоса. Целью исследования является определение диапазона параметров, при которых возникающий момент электромагнитных сил будет максимальным. Дополнительно исследуется влияние угла раствора П-образных элементов на форму профиля силы вдоль радиальной направляющей сердечника. Параметры формы сердечника, при которых электромагнитная сила вдоль сердечника остается постоянной, могут быть использованы в задачах электромагнитной сепарации.

Численное моделирование проводится методом конечных элементов в пакетах Ansys Mechanical (модуль Emag с использованием APDL) и ElmerFEM. В ходе расчетов получены зависимости момента электромагнитных сил от характерных параметров задачи. Результаты, полученные в разных пакетах, согласуются друг с другом.

### Литература

- [1] Верте, Л. А. Электромагнитный транспорт жидкого металла // М.: Металлургия, 1965. – 120 с.
- [2] Khripchenko S., Kolesnichenko I., Dolgikh V., Denisov S. Pumping effect in a flat MHD channel with an electrovortex flow // Magnetohydrodynamics. – 2008. – Т. 44, №. 3. – С. 303-313.
- [3] Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I. Electro-vortex centrifugal pump // Magnetohydrodynamics. – 2016. – Т. 52. – С. 25-34.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ПО ОБЪЕМУ ЖИДКОСТИ В СМЕСИТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ

Борзенко Е.И., Гарбузов Д.Н., Ефремов М.А.

Томский государственный университет, Томск

<mailto:borzenko@ftf.tsu.ru>, <mailto:garbuzov98@ftf.tsu.ru>, <mailto:33murman@gmail.com>

Выполнено математическое моделирование течения неньютоновской жидкости в смесительном аппарате с вращающейся с постоянной скоростью одной или двухлопастной мешалкой с учетом наличия в потоке твердых частиц. Математическую основу постановки задачи образуют уравнения движения и неразрывности, которые замыкаются реологическим уравнением состояния. Рассмотрены случаи бингамовской и степенной жидкостей. Движение частиц описывается динамическим уравнением, включающим лобовое сопротивление согласно закону Стокса. На твердых стенках смесительного аппарата и мешалки задаются условия прилипания. Используется плоское приближение, которое справедливо для потоков с небольшими значениями чисел Рейнольдса.

Задача решается численно с помощью метода контрольного объема, реализованного на ортогональной структурированной сетке с нерегулярным шагом. Уравнение неразрывности удовлетворяется с использованием алгоритма SIMPLE. Выполнена регуляризация реологического закона с целью устранения сингулярности реологических законов в областях с низкой интенсивностью скоростей деформаций. Уравнение движения твердых частиц интегрируется по времени со вторым порядком точности.

Проведенные параметрические исследования показали, что рассматриваемые течения характеризуются наличием циркуляционных и застойных зон, областей квазитвердого движения. Для бингамовских и псевдопластичных сред вдоль внешней стенки и в окрестности лопасти реализуются области с низкой интенсивностью. Процесс диспергирования твердых частиц по объему идет по двум механизмам. Первый – протекает в области сдвигового течения вдоль внешней стенки с образованием характерной слоистой структуры, второй механизм реализуется в циркуляционных зонах и характеризуется локальным перемешиванием.

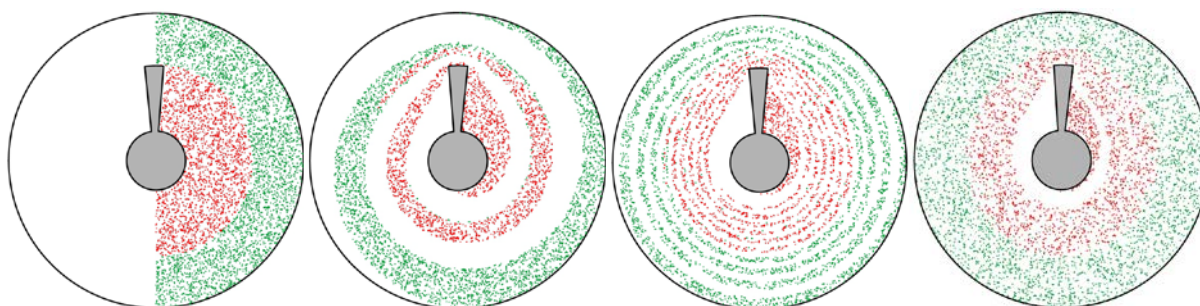


Рис. 1 – распределение частиц после 0, 2, 10, 80 оборотов

Для количественной оценки смешения жидкости с частицами рассчитывается оригинальная характеристика неоднородности, и на ее основе выполняется сравнительный анализ. Так же проанализированы значения интеграла диссипативной функции с точки зрения энергетических затрат на организацию течения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00594).

## **СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УСЕЧЁННЫХ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ С ЖИДКОСТЬЮ**

Бочкарёв С.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
bochkarev@icmm.ru*

Известно [1], что переменная толщина конструкции является одним из инструментов оптимизации, который даёт возможность изменять жёсткость за счёт перераспределения материала в критических областях без общего увеличения массы. Поскольку даже незначительные изменения в толщине оказывают влияние на частотный спектр, выявление продольного профиля, обеспечивающего наилучшие динамические характеристики, стало предметом исследований в различных публикациях. В отличие от пустых конических [2] или цилиндрических оболочек с жидкостью [3], существующие исследования конических, содержащих жидкость, ограничены линейным распределением толщины по длине. Изучение влияния разнообразных законов изменения толщины на фундаментальную частоту колебаний усечённых конических оболочек, полностью или частично заполненных сжимаемой жидкостью, является целью настоящей работы.

Поведение упругой конструкции рассматривается в рамках классической теории оболочек, уравнения которой записываются в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно новых неизвестных. Малые колебания жидкости описываются линеаризованными уравнениями Эйлера, которые в акустическом приближении сводятся к волновому уравнению относительно гидродинамического давления и записываются в сферической системе координат. Его преобразование к системе обыкновенных дифференциальных уравнений выполняется методом обобщённых дифференциальных квадратур. Решение сформулированной краевой задачи осуществляется методом ортогональной прогонки Годунова [4]. Вычисление собственных частот реализуется с помощью пошаговой процедуры и метода Мюллера. Достоверность получаемых результатов подтверждена сравнением с известными численно-аналитическими решениями.

Для прямых конических оболочек с различными углами конусности, значениями параметра переменности толщины, уровнем заполнения жидкостью и комбинациями граничных условий (свободное опирание, жёсткое и консольное закрепления) исследованы зависимости частот колебаний, полученных при степенном (линейном и квадратичном, имеющих симметричную и несимметричную формы) и гармоническом (с положительной и отрицательной кривизной) изменениях толщины. Изучена возможность существования конфигураций, низшие частоты которых превышают значения, соответствующие эквивалентной оболочке постоянной толщины.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

### Литература

- [1] Tornabene F., Fantuzzi N., Baccocchi M., Viola E., Reddy J.N. A numerical investigation on the natural frequencies of FGM sandwich shells with variable thickness by the local generalized differential quadrature method // *Appl. Sci.* – 2017. – Vol.7, No. 2. – 131.
- [2] Бочкарёв С.А. Собственные колебания усечённых конических оболочек переменной толщины // *Вычислительная механика сплошных сред.* – 2020. – Т. 13, № 4. – с. 402-413.
- [3] Бочкарёв С.А., Матвеев В.П. Анализ собственных колебаний цилиндрических оболочек переменной толщины, частично заполненных жидкостью // *Труды ИММ УрО РАН.* – 2023. – Т.29, № 2. – с. 27-40.
- [4] Бочкарёв С.А., Лекомцев С.В., Матвеев В.П. Собственные колебания усечённых конических оболочек, содержащих жидкость // *ПММ.* – 2022. – Т. 86, № 4. – с. 505-526.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ**

Бочкарёв С.А., Сенин А.Н.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[bochkarev@icmm.ru](mailto:bochkarev@icmm.ru), [senin.a@icmm.ru](mailto:senin.a@icmm.ru)

Известно [1], что при частичном заполнении жидкостью конструкций на её свободной поверхности имеет место эффект волнообразования (плескания), вызванный воздействием гравитационного поля. В этом случае при решении модальной задачи появляется значительное количество плескательных мод колебаний, усложняющих анализ динамического поведения, и ими, как правило, пренебрегают. При неблагоприятной комбинации параметров плескательные моды становятся сопоставимыми по величине со связанными модами гидроупругих колебаний, и такое упрощение задачи становится недопустимым [2]. Целесообразным является разработка алгоритма, в котором учитывается плескание, но соответствующие моды колебаний исключаются из общего частотного спектра. При исследовании границ гидроупругой устойчивости её оценка основывается на вычислении и анализе комплексных собственных значений связанной системы уравнений при последовательно возрастающих скоростях потока жидкости. В этом случае при наличии свободной поверхности проблема исключения плескательных мод колебаний становится особенно актуальной.

Целью работы является разработка математической постановки и конечно-элементного алгоритма её реализации, предназначенных для исследования собственных частот колебаний и границ гидроупругой устойчивости горизонтально ориентированной цилиндрической оболочки кругового сечения, частично заполненной текущей в поле силы тяжести жидкостью. Также учитывается изменение напряжённого недеформированного состояния, вызванное воздействием гидростатических сил на смоченной поверхности упругого тела со стороны жидкости. Решение задачи осуществляется в трёхмерной постановке с использованием метода конечных элементов. Движение сжимаемой жидкости описывается с помощью волнового уравнением через потенциал возмущения скорости. При моделировании оболочки предполагается, что её криволинейная поверхность достаточно точно аппроксимируется совокупностью плоских сегментов, деформации в которых определяются с помощью соотношений классической теории тонких пластин, основанной на гипотезах Кирхгофа — Лява. Достоверность получаемых результатов подтверждена сравнением с известными численно-аналитическими решениями с учётом и без учёта эффектов плескания.

Проанализирован вклад, оказываемый гравитационным полем, на собственные частоты колебаний и критические скорости потери устойчивости при различных уровнях заполнения оболочек с разными комбинациями граничных условий.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

### Литература

- [1] Ibrahim R.A. Liquid sloshing dynamics: Theory and applications. – 2005. – 970 p.  
[2] Bochkarev S.A., Lekomtsev S.V., Senin A.N. Natural vibrations and stability of loaded cylindrical shells partially filled with fluid, taking into account gravitational effects // Thin-Walled Structures. – 2021. – Vol. 164. – 107867.

## ДИНАМИКА МИКРОРЕАКТОРА СО СМЕСИТЕЛЕМ МАРАНГОНИ

Брацун Д.А., Краснякова Е.А., Мизев А.И., Сираев Р.Р.

*Институт механики сплошных сред, Пермь*

[dmitribratsun@rambler.ru](mailto:dmitribratsun@rambler.ru)

Проточные микрожидкостные устройства являются основой современной малотоннажной химии, активно используемой в микробиологии, тонком органическом синтезе, фармацевтике, биомедицине и т. д. Удобство использования проточных микрореакторных систем по сравнению с традиционными реакторами загрузочного типа заключается в более высокой производительности вследствие исключения стадий загрузки-разгрузки и очистки из технологической цепочки, возможности тонкой настройки процесса в ходе реакции, что обеспечивают простоту управления, стабильный расход реагентов и энергии благодаря небольшому объему зоны реактора. Кроме того, конструирование разветвленной цепи из нескольких устройств позволяет совместить в одной установке сразу несколько реакционных процессов. Основным элементом таких устройств является микроканал, в устье которого происходит соединение реагирующих растворов, а сама реакция протекает по мере их движения вдоль канала. В условиях ламинарного режима течения в микроканалах доминирующий механизм перемешивания за счет диффузии становится неэффективным, что требует включения конвективных механизмов смешения. Существующие подходы основаны на создании в канале вихревых структур либо за счет сложной топологии канала, либо за счет использования внешних силовых полей. Ранее нами был предложен новый метод смешения для микроканалов, не требующий внешних полей и сложной формы границ и основанный на использовании концентрационного эффекта Марангони [1,2]. Для этого на некотором расстоянии от устья канала, где происходит контакт реагирующих сред, создается пузырек, частично перекрывающий поток. Если один из компонентов реакционной системы является поверхностно-активным, на поверхности пузырька возникает градиент поверхностного натяжения, что приводит к генерации концентрационного течения Марангони, интенсивно перемешивающего жидкости. Особенность обнаруженного течения в том, что оно развивается в форме релаксационных колебаний, когда за быстрой активной фазой, отвечающей конвекции Марангони, следует медленная фаза восстановления первоначального градиента концентрации основным потоком. Несмотря на то, что процесс протекает импульсно, за пузырьком образуется почти однородный раствор. Процесс был детально исследован на модельной нереакционной системе. В настоящем докладе демонстрируется эффективность предложенного ранее метода для реальной реакционной системы на примере реакции нейтрализации слабой кислоты и сильного основания и приводится сравнение с нереакционным случаем. Представлены результаты экспериментального и численного исследования пространственно-временных характеристик наблюдаемых конвективных режимов и эффективности работы микросмесителя в зависимости от управляющих параметров задачи. Показано, что, используя только расход реагентов в качестве управляющего параметра, можно в широких пределах регулировать степень перемешивания и, следовательно, скорость протекания реакции.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

### Литература

- [1] Bratsun D. *et al.* Adaptive Micromixer Based on the Solutocapillary Marangoni Effect in a Continuous-Flow Microreactor // *Micromachines*. – 2018. – Vol.9, No.11. – Art. 600.
- [2] Krasnyakova E. *et al.* Gravity-Independent Relaxation Oscillations Enhancing Mixing Performance in a Continuous-Flow Microchannel // *Microgravity Science and Technology*. – 2024. – V. 36. №. 6. – P. 67.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ И В ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Брюханов И.А.<sup>1</sup>, Фомин Е.В.<sup>1,2</sup>, Утешев А.В.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>НИИ Механики, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

<sup>2</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск

*ibryukhanov@gmail.com*

Проводится молекулярно-динамическое моделирование ударного сжатия кристаллов медных сплавов и молибдена в широком диапазоне температур и скоростей удара [1-3]. Исследуется эволюция структура ударной волны и характер затухания напряжения на упругом предвестнике. Также проводится моделирование высокоскоростного сжатия кристаллов алюминия с дислокациями при различных температурах.

Установлено, что наличие дислокаций в моделях кристаллов молибдена позволяет корректно описать степень затухания упругого предвестника с имеющимися экспериментами, в диапазоне 0.25-0.45 [1]. Изучено влияние примесей в виде твердого раствора на затухание упругого предвестника в меди [2]. Установлено, что когда примеси сильно тормозят движение дислокаций, то упругий предвестник почти перестает затухать [2]. Показано, что несмотря на то, что в кристаллах меди наблюдается рост напряжения на упругом предвестнике с температурой, при высокоскоростном сжатии аналогичного роста напряжения течения с температурой не наблюдается [3]. Напряжение течения, наоборот, снижается с температурой.

Рост напряжения на упругом предвестнике с температурой обычно связывают со сменой характера пластической деформации при повышенных скоростях деформирования. В работе делаются попытки наблюдать скоростное упрочнение в экспериментах на стержне Гопкинсона-Кольского с медными образцами после отжига. Обсуждаются возможности модификации установки для изучения скоростного упрочнения, а также использование методов многомасштабного моделирования, включая метод молекулярной динамики.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-71-00088, <https://rscf.ru/en/project/22-71-00088/>.

### Литература

- [1] Bryukhanov I.A., Fomin E.V. Atomistic simulation of shock compression of bcc molybdenium single crystals: role of preexisting dislocations and temperature. // J. App. Phys. – 2025. submitted.
- [2] Bryukhanov I.A., Chaikovsky D. Role of solid solution strengthening on shock wave compression of [111] copper crystals // J. App. Phys. – 2024, 135, 22.
- [3] Bryukhanov I.A. Role of temperature and preexisting dislocation network on the shock compression of copper crystals // Int. J. Plast – 2023, 103599



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ В ИСКУССТВЕННО ЗАМОРАЖИВАЕМЫХ ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТАХ

Бублик С.А., Семин М.А., Левин Л.Ю.

Горный институт УрО РАН, Пермь  
[serega-bublik@mail.ru](mailto:serega-bublik@mail.ru), [seminma@inbox.ru](mailto:seminma@inbox.ru), [aerolog\\_lev@mail.ru](mailto:aerolog_lev@mail.ru)

Замораживаемый грунт представляет собой сложную мультикомпонентную среду, в которой протекает множество взаимосвязанных физических процессов, влияющих на эксплуатационные характеристики конструкций из замороженных грунтов [1]. Одним из таких процессов является морозное пучение — явление, при котором миграция поровой воды к фронту замораживания, замерзание и расширение воды, а также образование ледяных прослоек приводят к деформации грунтового скелета, увеличению объема грунта и поднятию его поверхности [2]. Особое значение при морозном пучении имеет присутствие растворенных солей в поровом пространстве влажных грунтов [3]. Растворенные соли существенно влияют на величину потенциала грунтовой влаги в незамерзших пленках за счет понижения точки замерзания и изменения осмотического давления [4]. Засоленность грунтов является значимым фактором и при строительстве шахтных стволов с применением специального способа искусственного замораживания [5]. При строительстве стволов калийных рудников соль может присутствовать в подземных водах надсолевых толщ вблизи контакта с водозащитной толщей.

В настоящей работе представлены результаты лабораторных экспериментов по морозному пучению различных образцов засоленного грунта (глины, мела, глинистого песка) и приводится теоретическая интерпретация полученных экспериментальных данных с использованием математического моделирования.

В ходе лабораторных экспериментов установлено, что увеличение концентрации соли в целом снижает интенсивность пучения, за исключением области малых концентраций (до 0,0035 кг соли на кг сухого минерала). Показано уменьшение объема поступающей к фронту замораживания влаги с ростом начального содержания соли, при этом общая масса транспортируемой соли увеличивается. Результаты математического моделирования позволили подтвердить и обосновать физически выявленный в эксперименте немонотонный характер изменения влажности мерзлой зоны при малых концентрациях соли.

### Литература

- [1] Chen Z., Guo X., Shao L., Wang X., Li S. Calorimetry of a multicomponent system for the analysis of frozen soil specific heat test considering the effect of latent heat // Eurasian Soil Science. – 2020. – т. 53. – с. 207-214.
- [2] Коршунов А. А., Чуркин С. В., Невзоров А. Л. Инновационное лабораторное оборудование для изучения процесса морозного пучения грунтов // Construction and Geotechnics. – 2020. – т. 11, №. 4. – с. 5-19.
- [3] Zhang W., Lei H., Wang L., Bo Y., Zhan C. Investigation and prediction on the freezing point of the clay under different salinity conditions // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2024. – т. 83, № 8. – Статья № 341.
- [4] Чеверев В. Г., Брушков А. В., Половков С. А., Покровская Е. А., Сафронов Е. В. Анализ представлений о механизме криогенной миграции воды в промерзающих грунтах // Криосфера Земли. – 2021. – т. 25, №. 5. – с. 3-12.
- [5] Ольховиков Ю. П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. – М.: Недра, 1984. – 238 с.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ БИДОМЕННЫХ ЭФФЕКТОВ В СЕРДЕЧНОЙ ТКАНИ

Вассерман И.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт механики Сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[igorw@icmm.ru](mailto:igorw@icmm.ru)

Наиболее полное описание электрических процессов в миокарде дает бидоменная модель, где сердечная мышца рассматривается, как как две анизотропные проводящие среды – внеклеточное и внутриклеточное пространство, взаимодействующие через мембрану. Для большинства задач описывающих распространение волны возбуждения от уже сформировавшегося очага возбуждения достаточно более простой монодоменной модели полученной при предположении, что тензоры проводимости внутриклеточного и внеклеточного пространства подобны. Однако, бидоменная модель необходима, когда нужно исследовать сам процесс формирования очагов возбуждения от внешних воздействий и их начальную конфигурацию. В общем случае необходимо использовать полную бидоменную модель, которая приводит к необходимости решения нелинейной жесткой краевой задачи в частных производных. При малой силе воздействия и медленных процессах для решения вышеупомянутых задач может быть использована линеаризованная статическая бидоменная модель, приводящая к гораздо более простой линейной краевой задаче. В данной работе рассмотрено решение методом конечных элементов этой и сравнение численных и аналитических решений.

Здесь рассмотрены две задачи. Одна из них – это поляризация полосы сердечной ткани с изолированными границами и волокнами, подходящими к этим границам под углом при прохождении вдоль этой полосы электрического тока. Здесь удалось достичь практически полного совпадения аналитического и численного решений в середине фрагмента полосы. Следовательно, эту задачу можно использовать для верификации метода конечных элементов в применении к линеаризованной статической бидоменной модели. Для эффективного решения в данном случае достаточно билинейных элементов при не слишком мелком разбиении области.

Другой задачей является образование виртуальных электродов - областей деполяризации и гиперполяризации, возникающих при подведении к миокарду электрического тока в малой области. Их возникновение, с одной стороны, может приводить к возбуждению спиральных волн, с другой стороны может быть использовано в процессе дефибрилляции. Для этой задачи точное аналитическое решение есть только в вырожденном случае подобия тензоров вне- и внутриклеточной проводимости, то есть когда эффект отсутствует. Для оценки конфигурации электродов существует только приближенное решение использующее возмущение по малому параметру вокруг вышеупомянутого аналитического решения. В реальности этот параметр не является малым, поэтому в данном случае аналитические методы применимы либо для грубой оценки, либо для тестирования численных методов. Здесь удалось достичь совпадения численного и аналитического решения только для вырожденного случая. Для общего случая удалось получить только качественные результаты. Необходимо дальнейшее исследование влияния граничных условий, размеров области моделирования, качества разбиения и степени аппроксимации.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

## АБСОЛЮТНАЯ И ГЛОБАЛЬНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ

Веденеев В.В., Гареев Л.Р., Зайко Ю.С., Трифонов В.В., Экстер Н.М.

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

[vasily@vedeneev.ru](mailto:vasily@vedeneev.ru), [gareev@imec.msu.ru](mailto:gareev@imec.msu.ru), [zayko@imec.msu.ru](mailto:zayko@imec.msu.ru), [exter@imec.msu.ru](mailto:exter@imec.msu.ru)

В работе рассматривается семейство профилей скорости затопленной струи, которые являются в плоскопараллельном приближении абсолютно неустойчивыми. Профили задаются двумя параметрами, первый из которых отвечает за положение единственной точки перегиба на профиле, второй — за толщину сдвигового слоя [1]. Реализован алгоритм определения длины участка локальной абсолютной неустойчивости струи с заданным входным профилем скорости — то есть расстояния, на котором абсолютная неустойчивость сменяется конвективной. Получена зависимость этой длины от параметров, задающих входной профиль.

Аналитически получена связь между характеристиками локальной абсолютной неустойчивости, рассчитанной в плоскопараллельном приближении, и глобальной неустойчивостью [2, 3] струи, эволюционирующей в пространстве. Продемонстрирован входной профиль скорости, соответствующий достаточно большой длине зоны локальной абсолютной неустойчивости, при которых имеет место глобальная неустойчивость пространственно развивающейся струи. Таким образом, доказана возможность глобальной неустойчивости плоских затопленных струй, имеющих специальные распределения скорости.

Проведены эксперименты на установке, создающей плоскую затопленную струю воздуха. Её канал спрофилирован так, что вблизи выходного сечения формируется профиль скорости, для которого теоретически доказана глобальная неустойчивость. Обсуждается отличие экспериментальных результатов от “обычных” затопленных струй.

### Литература

- [1] Vedeneev V., Nikitin N. Absolute instability of plane incompressible jets // J. Fluid Mech. 2023. V. 962. A4.
- [2] Le Dizes S., Huerre P., Chomaz J.M., Monkewitz P.A. Linear global modes in spatially developing media // Philos. Trans. R. Soc. London A. 1996. V. 354. No 1705. P. 169–212.
- [3] Couairon A., Chomaz J.-M. Fully nonlinear global modes in slowly varying flows // Phys. Fluids. 1999. V. 11. No 12. P. 3688–3703.

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭВОЛЮЦИЮ ТЕКСТУРЫ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ VT1-0 И VT6

Вережак М.В.<sup>1</sup>, Плехов О.А.<sup>2</sup>, Жеребцов С.В.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ИМСС УрО РАН, Пермь

<sup>3</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Белгород, 308015, Россия

Verezhack.m@icmm.ru, POA@icmm.ru, Zherebtsov@bsu.edu.ru

Сплавы VT1-0 и VT6 применяются как конструкционные материалы для изготовления различных видов изделий, деталей и конструкций. Они используются в авиационно-космической технике для изготовления сборных конструкций летательных аппаратов (авиационных лапоток газотурбинных двигателей), полуфабрикатов и баллонов, работающих под давлением. Повышение долговечности материалов конструкций является актуальной задачей, особенно в авиаотрасли. Существуют множество методов обработки поверхности сплавов для улучшения их физико – механических свойств. Такие виды обработок, как ультразвуковая [1] или дробеструйная обработка используются в промышленности для упрочнения поверхностного слоя изделия. Но такие методы не позволяют обрабатывать детали сложной конфигурации, в отличие от метода лазерной ударной обработки (ЛУО) [2].

Известно, что кристаллографическая текстура существенным образом влияет на свойства поликристаллических материалов. Например, острая текстура магния приводит к такой анизотропии свойств, что листы магниевых сплавов после прокатки препятствуют проведению штамповки [4]. Известно, что трансформаторная сталь имеет высокие коэффициенты намагниченности при текстуре близкой к (110)[001] (текстура Госса) [5]. Управляя и изменяя текстуру при определённых технологических операциях, возможно изменять заданные свойства материала.

Авторы работ [3] показали, что после проведения ЛУО в сплавах VT6 и VT1-0 не наблюдалось изменений в микроструктуре (размер зёрен, механическая текстура). Показано, что при определённых режимах обработки наблюдается увеличение усталостных характеристик материала.

Рентген-фазовый анализ показал, что образцы сплавов VT1-0 и VT6 состоят из  $\alpha$ -Ti. Вторичные фазы присутствуют в малом количестве. Результаты рентгеновских исследований показали, что изменение кристаллографической текстуры в VT1-0 и VT6 после лазерной ударной обработки не происходит.

### Литература

- [1] Abdulstaar, M., Mhaede, M., Wollmann, M. and Wagner L. (2014) Investigating the effects of bulk and surface severe plastic deformation on the fatigue, corrosion behavior and corrosion fatigue of AA5083, *Surface and Coatings Technology*, 254, pp. 244–251. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.06.026.
- [2] Wu, J., Zhao, J., Qiao, H., Hu, X. and Yang, Y. (2020) The new technologies developed from laser shock processing, *Materials*, 13(6). DOI: 10.3390/ma13061453.
- [3] Vshivkov, A.N., Iziumova, A.Y., Gachegova, E.A. et al. Structural and Fatigue Features of Ti64 Alloy after Different Laser Shock Peening. *Russ Phys J* 67, 287–295 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03120-5>
- [4]. Serebryany, V., Dobatkin, S.V., Kopylov, V.I., Nikolayev, D.I. and Brokmeier, H.G., 2010, February. Texture, Microstructure, and Ductility of Mg-Al-Zn Alloy after Equal Channel Angular Pressing. In *Materials Science Forum* (Vol. 633, pp. 365-372).
- [5]. Kononov, A.A. and Matveev, M.A., 2018. Formation of the structure of grain-oriented silicon steel during hot rolling/ Formation of Structure During Hot Rolling of Electrical Anisotropic Steel. St. Petersburg Polytechnic University. *Journal of Engineering Sciences and Technology*, 24(1), p.104.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ ПЛАНЕТ ЗЕМНОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ WRF-ARW**

Ветров А.Л.<sup>1</sup>, Быков А.В.<sup>1,2</sup>, Калинин Н.А.<sup>1,2</sup>, Фрик П.Г.<sup>2</sup>, Сухановский А.Н.<sup>2</sup>, Степанов Р.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

<sup>2</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[vetrov@psu.ru](mailto:vetrov@psu.ru)

Несмотря на множество превосходных исследований общей циркуляции атмосферы, полного объяснения причин возникновения и развития воздушных течений глобального масштаба на нашей планете до сих пор не получено.

Численная гидродинамическая региональная модель WRF-ARW широко используется для исследования мезомасштабных атмосферных процессов и оперативного прогноза погоды. Одна из реализаций модели позволяет воспроизводить метеорологические процессы в глобальном масштабе. В данной работе глобальная WRF-ARW применяется для изучения базовых географических и геофизических факторов, определяющих характер общей циркуляции атмосферы. Эта задача решается через сравнение характеристик циркуляции на гипотетической идеализированной планете и Земле. Для получения реальных характеристик общей циркуляции атмосферы Земли были использованы данные ре-анализа Национального центра прогнозов в области окружающей природной среды и Министерства энергетики США (Reanalysis-2). Другим вариантом воспроизведения циркуляции на планете был численный эксперимент глобальной модели WRF-ARW с реальными начальными данными, но без обеспечения их ежедневной актуализации. В этом случае температура поверхности океана остается постоянной (на условиях, которые сложились 1 января 2012 г.), все остальные метеорологические величины испытывали суточные и сезонные колебания.

Полученные результаты показали влияние материков и океанов на формирование усреднённых полей скорости ветра и температуры. Усреднённые поля широтной и долготной составляющей скорости ветра для идеализированной планеты точнее всего совпадают с режимом воздушных течений в Северном полушарии. В Южном полушарии из-за воздействия Антарктического континента наблюдается существенное изменение структуры воздушных течений, прежде всего в поле меридиональной составляющей скорости ветра. В Северном полушарии усредненный характер движения близок к распределению потоков для типа планеты с одним зонально ориентированным экваториальным океаном. Это свидетельствует о том, что несмотря на преобладающую океаничность Южного полушария и, соответственно, большую однородность в типе подстилающей поверхности, интегральный вклад Антарктического континента оказывает существенное влияние на нарушение идеализированной планетарной циркуляции.

Обнаружены различия в величине средней зональной скорости ветра: на идеализированной планете скорости ветра выше, чем в реальной атмосфере. Наибольшее отличие обнаружено в скорости восточных течений в тропической зоне. На идеализированной планете области со скоростями более 5 м/с занимают все тропосферу, а по данным ре-анализа такие скорости ветра отмечены только в нижней тропосфере в широтной зоне от 10° до 20° Южного полушария.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ПОЛИЛАКТИДА

Виндокуров И.В.<sup>1</sup>, Еленская Н.В.<sup>1</sup>, Ташкинов М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[ivv@pstu.ru](mailto:ivv@pstu.ru), [n.elenskaya@pstu.ru](mailto:n.elenskaya@pstu.ru) [M.Tashkinov@pstu.ru](mailto:M.Tashkinov@pstu.ru)

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений применения аддитивных технологий является создание протезов, имплантатов и других биомедицинских устройств из биосовместимых полимеров. Полилактид (PLA) играет ключевую роль в этой области, особенно в тканевой инженерии, где он используется для восстановления или замещения поврежденных тканей с помощью искусственных скаффолдов. Для эффективного использования PLA в биомедицине необходимо добиться оптимальных структурно-механических характеристик, что возможно благодаря тщательному выбору параметров аддитивного производства.

Ключевым аспектом является точность воспроизведения мелких деталей в процессе производства, что требует исследования влияния характерного размера образца на его механический отклик. Также изменение плотности материала существенно влияет на его эффективные свойства. Пустоты и дефекты, возникающие в процессе изготовления, являются концентраторами и приводят к разрушению в этих местах под действием нагрузок, что повышает плотность образца и подчеркивает необходимость контроля за процессом печати. При эксплуатации в жидкой среде такие особенности могут быть причиной изменения механических характеристик образцов в результате их насыщения влагой и/или резорбции их поверхности.

В рамках данного исследования были определены оптимальные параметры печати для образцов на сжатие из PLA [1], созданных по технологии послойного наплавления филамента. В частности, изучались свойства при деградации цилиндрических образцов различной высоты и диаметра при одинаковой скорости деформирования [2]. Был изучен процесс деградации в растворе NaCl концентрации 0.9% при температурах 37°C и 45°C. На начальных стадиях деградации, связанных с постепенным насыщением PLA жидкостью, наблюдалось увеличение модуля упругости и прочности на сжатие для цилиндрических образцов. На последующих стадиях упругий модуль насыщенных влагой цилиндрических образцов снижался. Было обнаружено, что при равных скоростях деформации размер образца не оказывает значительного влияния на механические свойства.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2024-0013).

### Литература

- [1] I. Vindokurov, Y. Pirogova, M. Tashkinov, and V. V. Silberschmidt, "Compression of additively manufactured PLA for biomedical applications: Effects of test conditions on properties of solid samples," *Polym. Test.*, vol. 130, no. December 2023, p. 108320, 2024, doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.108320.
- [2] N. Elenskaya, I. Vindokurov, E. Sadyrin, A. Nikolaev, and M. Tashkinov, "Experimental Evaluation of the Effect of Degradation on the Mechanical Behavior and Morphometric Characteristics of Functionally Graded Polymer Scaffolds," 2024. doi: 10.3390/polym16243474.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАССИВНЫХ БЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Витохин Е.Ю.<sup>1</sup>, Волынская М.А.<sup>1</sup>, Новицкий Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург  
[vitokhineyu@vniig.ru](mailto:vitokhineyu@vniig.ru), [volynskayama@vniig.ru](mailto:volynskayama@vniig.ru), [novitskiydv@vniig.ru](mailto:novitskiydv@vniig.ru)

Для экспериментального определения динамических характеристик сооружений – собственных частот и форм, традиционно используется метод с искусственным источником вибраций. Примером такого источника является дебалансная машина, использование которой связано с рядом сложностей, в том числе ввиду ее громоздкости и опасности нанесения повреждений сооружению и окружающему грунтовому массиву. В настоящее время в мире для определения динамических характеристик сооружения активно используются и развиваются методы операционного модального анализа (ОМА) [1]. Эти методы позволяют определять динамические характеристики на основе замеров реакции сооружения на воздействия естественных источников вибраций, таких как технологическое оборудование, установленное в сооружении. Одним из самых распространенных методов операционного модального анализа являются метод частотной декомпозиции области (FDD – frequency domain decomposition) [2]. В России также используется метод стоячих волн [3–5].

В данной работе приводятся результаты экспериментального определения собственных форм и частот бетонной гравитационной плотины с использованием метода декомпозиции в частотной области. Данный метод позволяет работать как с данными, замеренными одновременно во всех точках, так и с данными, полученными в результате последовательных измерений в разных точках. При этом, во втором случае требуется, чтобы во всех измерениях имелся хотя бы один не перемещаемый датчик, называемый опорным датчиком. На гребне и в потернах плотины проводились неодновременные измерения виброускорений с несколькими опорными датчиками. Измеренные записи виброускорений подвергались многоступенчатой математической обработке, после которой строится зависимость первого сингулярного числа от частоты для последовательности матриц взаимной спектральной плотности одновременно измеренных сигналов в программе ARTeMIS Modal. Идентификация собственных частот проводилась на основе критериев метода FDD и анализа форм колебаний на актуальном частотном диапазоне. Для построения собственных форм сооружения использовалась программа ARTeMIS Modal. Произведено сопоставление идентифицированных на основании измерений и конечно-элементного моделирования значений собственных форм и частот сооружения, которое показало высокую степень совпадения полученных результатов.

### Литература

- [1] P.Bukenya, P. Moyo, C. Oosthuizen, Comparative study of operational modal analysis techniques using ambient vibration measurements of a concrete dam // proceedings of ISMA2012-USD – 2012 p. 2635–2646.
- [2] Андрианова Е. А., Новицкий Д. В., Онищук В. С. Теоретическое обоснование идентификации собственных частот в методе FDD (декомпозиции в частотной области) // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета. Физико-математические науки, Т. 16, № 1, 2023, С. 82–96. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16107>
- [3] А.А. Бах, А.Ф. Еманов, В.И. Клещин, Изучение плотины Богучанской ГЭС методом стоячих волн// Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018., стр. 138–144, DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-138-144
- [4] А.Ф. Еманов, Восстановление когерентных составляющих волновых полей в сейсмике // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – 2004, Новосибирск
- [5] А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров, идентификация форм собственных колебаний при сейсмометрическом обследовании и мониторинге плотин ГЭС // Гидротехническое строительство. 2016. №2. С. 28–41.

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ПРИ СОЗДАНИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС СОВМЕСТНО СО СКАЛЬНЫМ ОСНОВАНИЕМ**

Витохин Е.Ю.<sup>1</sup>, Костылев В.С.<sup>1</sup>, Скворцова А.Е.<sup>1</sup>, Хазиахметов Т.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ПАО «РусГидро», Москва

[vitokhineyu@vniig.ru](mailto:vitokhineyu@vniig.ru), [kostylevvs@vniig.ru](mailto:kostylevvs@vniig.ru), [khasiakhmetovtr@rushydro.ru](mailto:khasiakhmetovtr@rushydro.ru)

Саяно-Шушенская ГЭС – самая мощная в России и одна из мощнейших в мире, обладает самой высокой арочно-гравитационной плотинной в России. Создание конечно-элементной модели, пригодной для диагностики и прогнозирования состояния такого сложного и ответственного сооружения требует особого комплексного подхода. Для того, чтобы достоверно воспроизвести напряженно-деформированное состояние сооружения при конечно-элементном моделировании с учетом нелинейной работы плотины и скального основания, требуется детальное воспроизведение не только сложнейшей геометрии, но и воспроизведение последовательности возведения и нагружения в период строительства, занявшего несколько десятилетий, а также особенностей работы в длительный период эксплуатации. Для этого требуется детальный анализ показаний тысяч датчиков напряжений, перемещений, ускорений, температуры и фильтрационного расхода за несколько десятилетий. Кроме того, необходим анализ многотомной проектной и исполнительной документации, а также результатов ранее выполненных научно-исследовательских работ. Тем не менее, несмотря на многообразие информации о плотине и основании Саяно-Шушенской ГЭС, на данный момент остается много вопросов об их актуальных физико-механических характеристиках, а также об фактическом НДС в бетоне плотины. Поэтому комплексный подход к построению диагностической модели Саяно-Шушенской ГЭС требует помимо анализа и учета всего имеющегося на данный момент массива информации о строении и состоянии системы «сооружение – основание», проведение дополнительных сложных исследований, таких как определение фактического НДС в бетоне плотины, а также комплекс геофизических, прессиометрических, фильтрационных исследований в скальном основании, а также исследования керны для уточнения физико-механических характеристик скальных пород основания. В данной работе представлен пример использования комплексного подхода для создания диагностических конечно-элементных моделей.



## СКОРОСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ

Волков Г.А.<sup>1,2</sup>, Казаринов Н.А.<sup>1,2</sup>, Лукашов Р.В.<sup>1</sup>, Логачев А.Н.<sup>1</sup>, Петров Ю.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

[g.volkov@spbu.ru](mailto:g.volkov@spbu.ru), [n.kazarinov@spbu.ru](mailto:n.kazarinov@spbu.ru), [rodion.lukashov@spbu.ru](mailto:rodion.lukashov@spbu.ru), [andre.log@bk.ru](mailto:andre.log@bk.ru),  
[y.v.petrov@spbu.ru](mailto:y.v.petrov@spbu.ru)

Исследуется скоростная чувствительность процессов разрушения или пластического деформирования сплошных сред. Экспериментальные исследования показывают, что механизм хрупкого разрушения двухкомпонентных материалов зависит от скорости нагружающего воздействия. Так, например, для бетонов при медленном статическом нагружении преимущественно наблюдается разрушение цементной матрицы или зоны сцепления с гранитным наполнителем. Однако, при переходе в ударный высокоскоростной режим нагружения наблюдается заметный рост разрушенных гранитных включений [1,2]

В работе предлагается новый метод анализа экспериментальных данных, позволяющий выявить в материале наличие скоростной чувствительности режима разрушения без какого-либо дополнительного исследования поверхности разрушения испытанных образцов. Работоспособность метода проверяется и демонстрируется на примере обработки данных динамических испытаний бетона и его составляющих: цементного камня и гранита. В рамках этого метода предлагается аналитическая модель, описывающая конкуренцию различных механизмов разрушения в зависимости от режима воздействия.

Показывается, что предлагаемый метод может также использоваться для выявления скоростной чувствительности механизмов пластического деформирования. Для проверки метода проводится обработка данных высокоскоростных испытаний стали в различных состояниях, отличающихся между собой средним размером зерен [3]. Показано, что для стали в ультрамелкозернистом состоянии, которое достигается в результате интенсивной пластической деформации, скоростная чувствительность режимов неупругого деформирования ниже, чем для крупнозернистых образцов.

### Литература

- [1] Yan D, Lin G., Dynamic properties of concrete in direct tension // Cement and Concrete Research – 2006 – т. 36, №7 – с. 1371.
- [2] Xiao J, Li L, Shen L, Poon CS., Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading // Cement and Concrete Research – 2015 – т. 71 – с. 46–55.
- [3] Tiarniyu A. A., Odeshi A. G., Szpunar J. A., Characterization of coarse and ultrafine-grained austenitic stainless steel subjected to dynamic impact load: XRD, SEM, TEM and EBSD analyses // Materialia – 2018 – т. 4. – с. 81-98.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА КОНЦЕНТРАЦИИ В ДВУХСЛОЙНОМ КАНАЛЕ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА**

Володин И.В.<sup>1</sup>, Алабужев А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

<sup>2</sup>*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

[ivanwolodin@gmail.com](mailto:ivanwolodin@gmail.com), [alabuzhev@mail.ru](mailto:alabuzhev@mail.ru)

В работе численно исследуется в поле тяжести течение вязкой жидкости в двухслойном плоском канале, состоящем из пористой среды и однородной жидкости над ней. Снизу пористый слой ограничен твердой стенкой, верхняя граница среды является свободной и недеформируемой.

Исследуется концентрационный перенос примеси в ограниченном канале с заданным градиентом концентрации на боковых стенках и перенос концентрации от локализованного конечного источника при заданной скорости основного потока. В рамках данной работы изучаются ламинарные течения жидкости, соответствующие режимам течения с низкими числами Рейнольдса.

Задача решается методом решеточных уравнений Больцмана [1]. Для описания пористой среды используется метод репрезентативного элементарного объема (Representative Elementary Volume – REV) [2]. Для уравнения концентрации используется дополнительный набор функций распределения [3, 4]. С помощью разложения Чепмена-Энскога можно свести применяемый дискретный алгоритм к макроскопическим уравнениям.

Получены поля скорости и концентрации при различных значениях коэффициента пористости и управляющих параметров задачи.

Работа И.В. поддержана бюджетной темой № 124021600038-9.

### Литература

- [1] Krüger T., Kusumaatmaja H., Kuzmin A., Shardt O., Silva G., Viggien E. The Lattice Boltzmann Method. Springer, 2017, P. 718
- [2] Guo Z., Zhao T.S. Lattice Boltzmann model for incompressible flows through porous media // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 66 (3). 036304
- [3] Guo Z., Shi B.C., Wang N.C. Fully Lagrangian and Lattice Boltzmann Methods for the Advection-Diffusion Equation // Journal of Scientific Computing. 1999. Vol. 14. P. 291–300
- [4] Chopard D., Falcone J. L., Latt J. The lattice Boltzmann advection-diffusion model revisited // Eur. Phys. J. Special Topics. Vol. 171. 2009. P. 245-249

## ОСРЕДНЕННАЯ ДИНАМИКА ДЛИННОВОЛНОВОЙ КОНВЕКЦИИ МАРАНГОНИ В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ

Володин И.В.<sup>1</sup>, Алабужев А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
[ivanwolodin@gmail.com](mailto:ivanwolodin@gmail.com), [alabuzhev@mail.ru](mailto:alabuzhev@mail.ru)

Рассматривается бесконечный тонкий слой несжимаемой вязкой жидкости на твердой подложке, подогреваемой снизу. На нижней границе задан постоянный тепловой поток в отличии от работы [1], где фиксировалась температура. Верхняя граница жидкости свободная и деформируемая. Подложка совершает вертикальные гармонические колебания заданной амплитуды и частоты в поле тяжести.

Амплитуда внешних вибраций значительно превышает толщину слоя. Частота внешних вибраций может меняться в пределах от ультранизкой (период колебаний сравним с характерным временем релаксации толщины пленки) до около акустической (толщина вязкого пограничного слоя мала по сравнению с толщиной пленки).

Используется длинноволновое приближение, метод решения задачи заключается в разделении динамики на быстрые пульсации и медленные процессы релаксации [2].

Получены амплитудные уравнения, описывающие осредненную динамику такой системы. При высокочастотных вибрациях используется метод осреднения [2] по толщине слоя жидкости, в результате чего получается амплитудное уравнение, аналогичное уравнению Копбосынова – Пухначева [3] в случае без вибраций.

В зависимости от параметров системы, вибрации могут оказывать как стабилизирующее, так и дестабилизирующее действие. Высокочастотные вибрации могут эффективным образом подавить развитие конвекции Марангони и стабилизировать поверхность пленки [1], однако большие частоты приводят к возникновению параметрической неустойчивости (рябь Фарадея).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00379).

### Литература

- [1] Shklyaev S., Alabuzhev A.A., Khenner M. Marangoni convection in a thin film on a vertically oscillating plate // Phys. Rev. E. 2015. V. 92, 013019.
- [2] Shklyaev S., Khenner M., Alabuzhev A.A. Enhanced stability of a dewetting thin liquid film in a single-frequency vibration field // Phys. Rev. E. 2008. V. 77, 036320.
- [3] Копбосынов Б.К., Пухначев В.В. Термокапиллярное движение в тонком слое жидкости // Гидромеханика и процессы переноса в невесомости. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 116-125.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСОЛИДАЦИИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ СПЛАВЛЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

Ворошилов Е.С., Груздь С.А., Кривилев М.Д.

*Удмуртский государственный университет, Ижевск, ул. Университетская 1, корп. 4  
evroshs@yandex.ru*

Аддитивные технологии (АТ) в настоящее время находятся на передовом крае производства деталей сложной формы в авиационной и космической технике, медицине, судостроении и других промышленных областях. Основным преимуществом этих технологий является быстрое производство изделий, которые трудно получить традиционными методами металлообработки. АТ в последнее время демонстрируют более масштабное развитие не только в производстве металлов, но также наблюдается прорыв в трехмерной (3D) печати полимерных композитных материалов, где армированные полимерные материалы по прочности сопоставимы с деталями из легких сплавов, производимых методом селективного лазерного сплавления (СЛП). Для достижения хороших механических свойств важно минимизировать дефекты, которые могут возникать из-за высокой остаточной пористости при использовании неправильных технологических приемов. Одним из эффективных способов предотвращения дефектов является компьютерное моделирование базовых процессов перед печатью на производстве.

В данной работе представлена упрощенная численная модель процесса селективного лазерного сплавления (СЛП), которая предсказывает пористость материала, фокусируясь на ключевых механизмах, влияющих на процессы плавления и консолидации. Основное внимание уделяется образованию дефектов и ожидаемому времени, необходимому для завершения консолидации порошкового слоя. Результаты моделирования консолидации порошка сравнены с экспериментальными данными для порошка нержавеющей стали 03X17H14M3 в процессе СЛП. Такая информация может быть далее использована для правильного выбора параметров СЛП, таких как скорость сканирования и мощность источника лазерного излучения.

Результаты расчетов показали умеренное влияние поверхностного натяжения на процесс консолидации и значительное влияние на него динамической вязкости. Для порошкового слоя толщиной 1-3 диаметра частицы образование поровых дефектов маловероятно. Для большей толщины возможен захват газа и образование поровых включений.

Авторы благодарят РОСАТОМ за финансовую поддержку в рамках проекта № ЕОТР-97.

### **Литература**

- [1] E. S. Voroshilov, R. M. Mosina, S. A. Gruzd, A. O. Ivantsov, O. A. Khlybov, T. P. Lyubimova and M. D. Krivilyov Capillary effects and consolidation kinetics during selective laser melting of 316L powder, *Physics of Fluids* 36 (4), 043306 (2024).
- [2] M. D. Krivilyov, S. D. Mesarovic, and D. P. Sekulic Phase-field model of interface migration and powder consolidation in additive manufacturing of metals, *J. Mater. Sci.* 52, 4155 (2017).

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВБЛИЗИ ВЕРШИНЫ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО УДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Плехов О.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[vshivkov.a@icmm.ru](mailto:vshivkov.a@icmm.ru), [fedorova@icmm.ru](mailto:fedorova@icmm.ru), [poa@icmm.ru](mailto:poa@icmm.ru)

Создание новых конструкционных материалов и использование современных методов их поверхностной обработки требуют развития существующих и создания методов прогнозирования долговечности и прочности конструкций. В настоящее время активно развивается метод лазерного ударного упрочнения (ЛУУ) металлов и сплавов [1]. При ЛУУ распространение упруго-пластической волны в материале формирует поле сжимающих остаточных напряжений, которое способствует увеличению срока службы материалов и инженерных конструкций.

В данной работе используется энергетический подход [2-4] для описания состояния материала при деформировании. Основной целью является определение методом инфракрасной термографии [5-7] диссипативных свойств образцов после лазерного ударного упрочнения при распространении усталостной трещины.

Исследование проводилось на плоских образцах из титанового сплава ВТ6 с концентратором напряжений. Область вокруг концентратора напряжений была обработана методом лазерного ударного упрочнения. В ходе усталостных испытаний образцы подвергались циклическому одноосному нагружению с постоянной амплитудой напряжения. Длина трещины измерялась методом падения электрического потенциала. Для регистрации температурного поля в области вершины трещины использовалась инфракрасная камера FLIR SC5000.

Тенденции изменения температуры в области вершины усталостной трещины в обработанных и необработанных образцах идентичны, но изменение температуры относительно начальной температуры в обработанных образцах значительно выше, чем в необработанных при той же длине трещины. Такое увеличение теплоотдачи, вероятно, вызвано пластической деформацией в поверхностном слое материала и (или) вероятным изменением теплофизических свойств после ЛУУ.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 22-79-10168.

### Литература

- [1] Kashaev N., Keller S., Staron P., Maawad E., Huber N., On the prediction of fatigue crack growth based on weight functions in residual stress fields induced by laser shock peening and laser heating // *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* – 2021. – т. 44. – с. 3463–3481.
- [2] Izumi Y., Fine M. E., Mura T., Energy considerations in fatigue crack propagation // *Int. J. Fracture.* – 1981. – т. 17. – с. 15-25.
- [3] Short J. S., Hoepfner D. W., A Global/local theory of fatigue crack propagation // *Engineering Fracture mechanics.* – 1989. – т. 33. - № 2. – с. 175-184.
- [4] Turner C.E., Koledni O., Application of energy dissipation rate arguments to stable crack growth // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* – 1994. – т. 17. – № 10. – с. 1109-1127.
- [5] La Rosa G., Risitano A., Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components // *International Journal of Fatigue.* – 2000. – т. 22. – с. 65-73.
- [6] Dong H., Zheng B., Chen F., Infrared sequence transformation technique for in situ measurement of thermal diffusivity and monitoring of thermal diffusion // *Infrared Physics & Technology.* – 2015. – т. 73. – с. 130-140.
- [7] Martínez K., et al., Thermal diffusivity measurements in solids by photothermal infrared radiometry: Influence of convection-radiation heat losses // *International Journal of Thermal Sciences.* – 2015. – т. 98. – с. 202-207.

## МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ТЕМПЕРАТУРЕ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

Вшивкова А.А., Швейкин А.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[vsivkova222@gmail.com](mailto:vsivkova222@gmail.com), [alexsh59@bk.ru](mailto:alexsh59@bk.ru)

Типичными экспериментально выявленными зависимостями для металлов и сплавов являются понижение напряжения течения с ростом температуры и/или понижением скорости деформации, увеличение скоростной чувствительности с ростом температуры, образование «ступеньки» на диаграмме нагружения при резком изменении этих параметров [1]. В силу существенности влияния на реализацию неупругого деформирования как текущих температуры и скорости деформации, так и предыстории их изменения, актуально создание моделей материала, способных учитывать это влияние. Подчеркнем, что модель при этом должна корректно описывать в т.ч. сложные траектории деформирования, в особенности при применении ее для оптимизации реальных технологических процессов.

Ранее авторами была предложена такая модель [2], основанная на физических теориях пластичности [3] и содержащая модификации некоторых элементов работ [4-6]. Параметры созданной модели были идентифицированы для алюминия, и далее с ее помощью были проведены вычислительные эксперименты на реверсивный сдвиг с разными, в т.ч. изменяющимися, температурами деформирования. Было достигнуто хорошее совпадение с экспериментальными данными [7]. Кроме того, было исследовано т.н. ортогональное нагружение – последовательность растяжения и чистого сдвига. Модель качественно корректно описывает наблюдаемое при этом повышение напряжения течения при смене типа нагружения [8] за счет явного учета латентного упрочнения по системам внутризеренного дислокационного скольжения.

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-2024-0002).

### Литература

- [1] Balasubramanian S., Anand L. Elasto-viscoplastic constitutive equations for polycrystalline fcc materials at low homologous temperatures // *J Mech Phys Solids*. – 2002. – V. 50. – №1. – P. 101–126.
- [2] Швейкин А.И., Вшивкова А.А., Трусов П.В. Двухуровневая конститутивная модель металла с комплексным учетом изменяющихся температурно-скоростных условий // *Физ. мезомех.* – 2024. – Т. 27, №2. – С. 50-68
- [3] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск.: Издательство СО РАН, 2019. – 605 с.
- [4] Anand L. Single-crystal elasto-viscoplasticity: application to texture evolution in polycrystalline metals at large strains // *Comput Methods Appl Mech Eng*. – 2004. – V. 193. – P.5359–5383.
- [5] Beyerlein I.J., Tome C.N. A dislocation-based constitutive law for pure Zr including temperature effects // *Int J Plast*. – 2008. – V. 24. – P. 867–895.
- [6] Terentyev D., Xiao X., Dubinko A., Bakaeva A., Duan H. Dislocation-mediated strain hardening in tungsten: Thermo-mechanical plasticity theory and experimental validation // *J Mech Phys Solids*. – 2015. – V. 85. – P. 1–15.
- [7] Vincze G., Rauch E.F., Gracio J.J., Barlat F., Lopes A.B. A comparison of the mechanical behaviour of an AA1050 and a low carbon steel deformed upon strain reversal // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53. – №4. – P. 1005–1013.
- [8] Yoshida K. Crystal plasticity model for describing the work hardening of A5052-O sheets subjected to various loading paths // *International Journal of Solids and Structures*. – 2024. – Vol. 291. – P. 112697.

## ПРЯМАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА СВОЙСТВА МИНИАТЮРНЫХ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Вяткин Я.В., Трусов П.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[viatkiniv@gmail.com](mailto:viatkiniv@gmail.com), [tpv@matmod.pstu.ac.ru](mailto:tpv@matmod.pstu.ac.ru)

При изучении поведения миниатюрных изделий возникает вопрос о влиянии т.н. «эффектов масштаба» на их физико-механические свойства. Учитывая особую важность для подобных деталей описания изменяющейся мезо- и микроструктуры, эффективным «инструментом» исследования представляется использование многоуровневых моделей, основанных на широком классе физических теорий пластичности [1], приобретающем все большее признание механиков и материаловедов для описания напряженно деформированного состояния материалов/конструкций из металлов и сплавов.

Взаимодействие внутренних и внешних границ кристаллов с дислокациями и прочими дефектами решетки является ключевым фактором при описании масштабных эффектов [2]. Таким образом, представляется актуальной задача учета влияния свободной поверхности в прямой модели упруговязкопластичности кристаллита мезоуровня. Существует ряд исследований [3–5], которые свидетельствуют о разупрочняющем характере влияния свободной поверхности на приповерхностные зоны образцов. В связи с этим данная работа посвящена модификации закона упрочнения систем скольжения краевых дислокаций для учета падения критических касательных напряжений вблизи свободной поверхности.

Для проверки адекватности итоговой модели был проведен ряд численных экспериментов над моно- и поликристаллическими образцами. Получены результаты решения краевых задач в объемной постановке. Испытания проводились для образцов с различными характерными размерами. Сравнение результатов показывает явное наличие эффекта масштаба, который проявляется в уменьшении предела текучести и напряжений течения с уменьшением характерных размеров образцов.

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 No FSNM-2024-0002).

### Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.
- [2] Arzt E. Size effects in materials due to microstructural and dimensional constraints: a comparative // Acta Materialia. – 1998. – Vol. 46, Iss. 16. – P. 5611–5626
- [3] Keller C., Hug E., Habraken A.M., Duchene L. Finite element analysis of the free surface effects on the mechanical behavior of thin nickel polycrystals // Int. J. Plasticity. – 2012. – Vol. 29. – P. 155–172
- [4] Stölken J.S., Evans A.G. A microbend test method for measuring the plasticity length scale // Acta Materialia. – 1998. – Vol. 46, Iss. 14. – P. 5109–5115
- [5] Yang B., Motz C., Rester M., Dehm G. Yield stress influenced by the ratio of wire diameter to grain size – a competition between the effects of specimen microstructure and dimension in micro-sized polycrystalline copper wires // Philosophical Magazine. – 2012. – Vol. 92, Iss. 25–27. – P. 3243–3256

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛЯХ СОСУДОВ И СОСУДИСТЫХ ПАТОЛОГИЙ

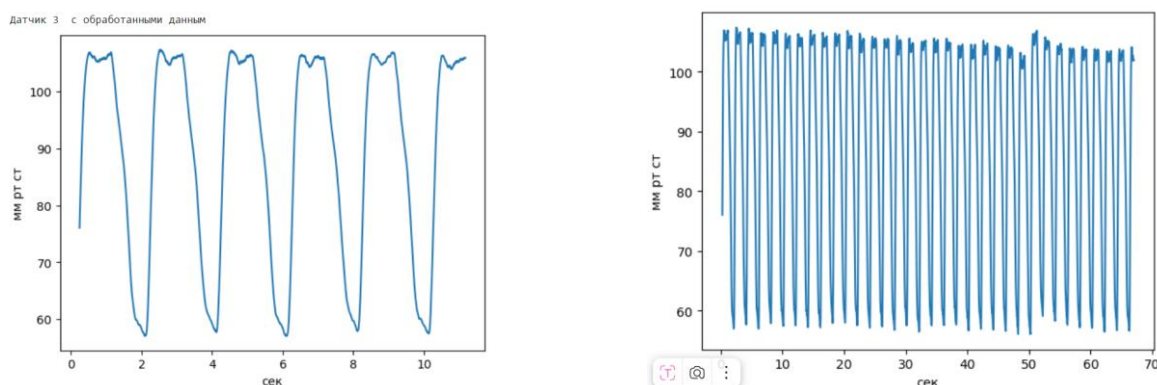
Гайфутдинов Р.А.<sup>1</sup>, Паршин Д.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

<sup>2</sup>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирск

[rinatgaifutdinov0412@gmail.com](mailto:rinatgaifutdinov0412@gmail.com), [daniilo.skiman@gmail.com](mailto:daniilo.skiman@gmail.com)

Аневризма брюшной аорты и ишемическая болезнь сердца (ИБС) относятся к одним из наиболее распространенным сосудистым патологиям, которые в свою очередь удерживают лидерство по смертности среди всех заболеваний по данным ВОЗ. Основной причиной ИБС является образование атеросклеротической бляшки, закупоривание сосудов миокарда и отмирание ткани миокарда в следствие этого. Одним из методов лечения стеноза коронарных артерий является установка коронарного стента. Несмотря на то, что численной гемодинамике коронарных артерий и аорты посвящено большое внимание [1] достаточно много вопросов возникает при постановке таких задач, а именно при задании граничных условий (реальных профилей течения и давления). Экспериментальное исследование гемодинамики на анатомических моделях сосудистых бифуркаций [2,3] позволяет получить новые знания в этом направлении и сделать постановки численных задач более правдоподобными.



**Рис.** Результаты измерения давления на малом временном диапазоне (слева), большом временном диапазоне (справа).

Работа посвящена созданию лабораторных комплексов для исследования гемодинамики бифуркации аорты в норме и при наличии патологии и выявлении с его помощью особенности гемодинамики сосудистых патологий. В ходе эксперимента обнаружено, что при увеличении сгиба угла в колене происходит падение давления до и после колена, а также наличие длинных волн в системе, что связано с упругостью стенок.

### Литература

[1] Мержоева Л. Р., Карпенко А.А., Паршин Д.В., Чупахин А.П., Моделирование гемодинамики в бифуркации аорты при наличии аневризмы //Марчуковские научные чтения. 2022, – т. 1. – с. 127–128.

[2] Gaifutdinov R.A., Kuyanov Yu.O., Khelinsky D.A., Krestyaninov O.V., Tulupov A.A., Parshin D.V. Towards effects from stent implantation into coronary bifurcation stenosis: experiment and simulation //Siberian Scientific Medical Journal. – 2024 – т. 44, № 1. – с. 23–31.

[3] Бойко А.В., Акулов А.Е., Чупахин А.П., Черевко А.А., Денисенко Н.С., Савелов А.А., Станкевич Ю.А., Хе А.К., Янченко А.А., Тулупов А.А. Измерение скорости потока вязкой жидкости и его визуализация двумя магниторезонансными сканерами //Прикл. мех. техн. физ. – 2017, – т. 58, № 2, – с. 26–31.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА НАПОЛНИТЕЛЯ (1D, 2D, 3D ЧАСТИЦЫ)

Гаришин О.К.<sup>1</sup>, Свистков А.Л.<sup>1</sup>, Шадрин В.В.<sup>1,3</sup>  
Возняковский А.П.<sup>2</sup>, Неверовская А.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт синтетического каучука, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
[gar@icmm.ru](mailto:gar@icmm.ru)

Исследовано механическое поведение эластомерных нанокompозитов в условиях конечных циклических деформаций. При этом использовалась программа "испытаний с вложенными циклами" [1]. По этой программе образец подвергается одноосному циклическому нагружению с уменьшающимися на каждом шаге амплитудой и скоростью деформирования, а также остановками на релаксацию при смене направления движения захватов разрывной машины.

Основным объектом экспериментальных исследований были эластомерные композиты на основе бутадиен-стирольного каучука. В качестве наполнителя использовались как монокомпонентные (только технический углерод (ТУ) — 3D частицы) так и бинарные наполнители: базовая часть из ТУ плюс второй наполнитель из детонационных наноалмазов (3D), наночастиц малослойного графена (2D) или многостенных углеродных нанотрубок (1D) (причем как исходных от производителя, так и модифицированных с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза) [2]. Общая массовая концентрация наполнителя всегда равнялась 50 массовых частей.

В результате проведенных исследований было установлено:

Существенное увеличение жесткости по сравнению с монокомпонентным наполнителем наблюдалось только для композитов, содержащих ТУ + модифицированные с помощью СВС углеродные нанотрубки. В остальных случаях переход к бинарным наполнителям слабо не сказывался на их значениях.

Цикловые потери при нагружении материала были примерно 1.5–2 раза больше чем при разгрузке, причем это соотношение слабо зависело от скорости деформирования.

Значительное превышение диссипативных потерь на первом цикле нагружения по сравнению с последующими (размягчение Маллинза) наблюдалось у всех испытываемых материалов. На потери от размягчения приходилась примерно половина от их общей величины, причем для композитов с 3D и 2D наполнителями она было несколько выше, чем для углеродных нанотрубок.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ПФИЦ УрО РАН. Регистрационный номер: АААА-А20-120022590044-7.

### Литература

[1] Гаришин О.К., Шадрин В.В., Возняковский А.П., Неверовская А.Ю. Циклические испытания вязкоупругих высокоэластичных материалов по программе «Вложенных циклов» // Вестник Пермского университета. Физика. – 2024. – № 3. – С. 40-49.

[2] Garishin O.K., Svistkov A.L., Voznyakovskii A.P., Tchypkina I.M., Neverovskaya A.Yu., Shadrin V.V. Anisotropic mechanical properties of elastomeric nanocomposites filled by carbon black, few-layer graphene, and carbon nanotubes // Materials Physics and Mechanics. – 2022. – V. 50, No 3. – P. 495-508.

## ЛАЗЕРНАЯ УДАРНАЯ ПРОКОВКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

Гачегова Е.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

[gachegova.e@icmm.ru](mailto:gachegova.e@icmm.ru)

В настоящее время лазерная ударная проковка (ЛУП) является одним из наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения металлов и сплавов. Она позволяет увеличить ресурс обрабатываемых деталей, повысить их усталостные свойства и устойчивость к коррозии [1-2]. Для достижения желаемого результата упрочнения необходимо подобрать множество различных параметров ЛУП. Одним из них является материал защитного покрытия. Целью данной работы является исследование влияния материала этого покрытия на состояние поверхности образцов, микротвердость и распределение остаточных напряжений, которые создаются в приповерхностном слое.

Образцы были изготовлены из титанового сплава ВТ6 и представляли собой тонкие квадратные пластины со стороной 40 мм и толщиной 3 мм. Для обработки использовался твердотельный импульсный Nd:YAG-лазер с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 10 нс. В качестве поглощающих покрытий были выбраны следующие материалы: алюминиевая фольга, виниловая лента и черная краска. Также был исследован режим обработки без покрытия. Измерения остаточных напряжений проводились методом сверления отверстий.

В результате эксперимента были сделаны следующие выводы. Все три покрытия выдержали обработку с выбранными параметрами. Анализ микротвердости образцов по глубине также не выявил существенных изменений. (рис 1а). Что касается остаточных напряжений (рис. 1б), то их анализ показал, что наибольший эффект от ЛУП достигается при использовании в качестве поглощающего покрытия черной краски или алюминиевой фольги.

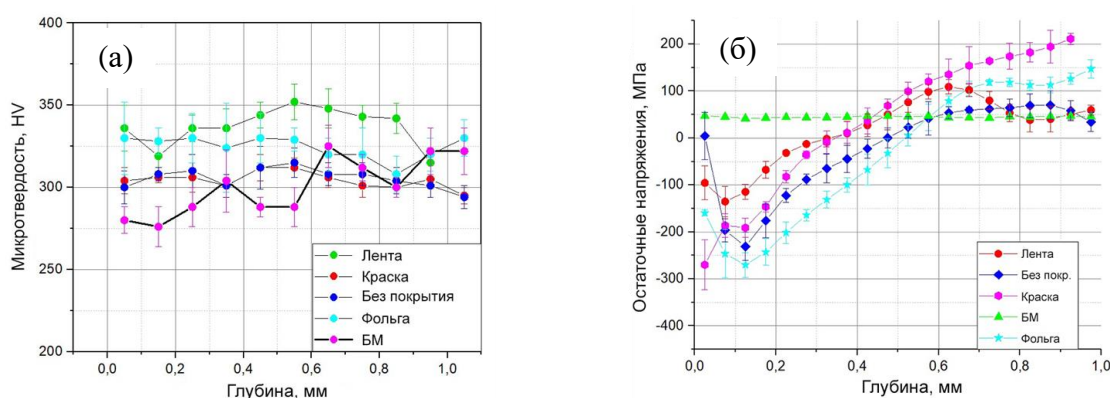


Рисунок 1. Распределение по глубине микротвердости (а) и остаточных напряжений (б)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

### Литература

- [1] Clauer A. H. Laser shock peening, the path to production //Metals. – 2019. – Т. 9. – №. 6. – С. 626.
- [2] Zhang X. C. et al. Improvement of fatigue life of Ti–6Al–4V alloy by laser shock peening //Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Т. 527. – №. 15. – С. 3411-3415.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА КОНТУРЕ

Герцен Т.А., Любимова Н.Ю., Любимова А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[tanger59perm@yandex.ru](mailto:tanger59perm@yandex.ru).

Перспективным направлением научно-практической фармации и косметологии является использование аппликационных лекарственных форм в виде тонких пленок (синтетических и природных) [1], а также заместительная терапия на базе поверхностно-активных веществ (ПАВ). Исследования таких объектов предполагают рассмотрение условий их равновесия, эволюцию, динамику [2, 3, 4].

Цель работы – провести наблюдения процесса колебаний пленок ПАВ, рассмотреть влияние ряда факторов (размеров контуров и плоского круглого груза, температуры, роль добавок к раствору ПАВ), предложить модель процесса.

Вертикальная пленка, соединяющая круглый контур и плоский круглой формы груз или тоже круглый контур, образует геометрическую фигуру – катеноид (симметричный, если диаметры контура и груза одинаковые и несимметричный, если они разные). Смещая из положения равновесия груз или нижний контур вниз, увеличиваем площадь поверхности пленки, после чего поверхностные силы стремясь минимизировать площадь поверхности пленки, тянут ее вверх. Так начинается колебательное движение пленки. Измерение периода колебаний проведено с помощью видеосъемки. В качестве теоретической модели сначала была рассмотрена более простая форма пленки - усеченный конус, затем катеноид. В обоих случаях рассчитана поверхностная энергия двухсторонней пленки и получено уравнение колебаний. Наблюдения и результаты решения уравнения колебаний показали, что колебания являются затухающими. В зависимости от способа практического использования пленки-аппликатора важным может быть как длительное затухание, так и быстрое (3-4 периода). Состав ПАВ подбирался экспериментально. Используются доступные моющие средства, в качестве добавок взяты глицерин и желатин.

### Литература

- [1] Кривошеев С.А. Аппликационные лекарственные формы. Пластыри / С.А. Кривошеев, И.А. Девяткина, Н.Б. Демина / Под общ. ред. В.А. Быкова. – М: МАКС Пресс. «Молодые ученые – медицине» (20–21 мая) . – 2016. – С. 136–139.
- [2] Isenberg С. The Science of Soap Films and Soap Bubbles. - Univ. of Kent at Canterbury. England, 1992. - 219 с.
- [3] Саранин В.А. Равновесие жидкостей и его устойчивость.– Ижевск.: 1995. – 172 с.
- [4] Сосинский А.Б. Мыльные пленки и случайные блуждания. – М.: Изд-во МЦНМО. - 2012. – 20 с.

## ИТЕРАЦИОННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ИСКЛЮЧЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В МОДЕЛЯХ ТЕЙЛОРА-БИШОПА-ХИЛЛА

Гладких П.А., Трусов П.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
gladkikh.p@yandex.ru, tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Свойства деталей из сплавов зависят от их мезо- и микроструктуры, эволюционирующей в ходе термомеханической обработки. Для описания данных процессов вычислительно эффективными являются двухуровневые упругопластические (УП) модели [1], позволяющие проводить расчёты с более крупными временными шагами по сравнению с моделями упруговязкопластичности. Большинство из них — развитие моделей Тейлора – Бишопа – Хилла (ТБХ) [2–4], однако при реализации УП моделей существует проблема неопределённости выбора наборов активных систем скольжения (СС). Указанная неопределённость связана с тем, что количество линейно независимых уравнений в упругопластических моделях не может быть больше пяти. В то же время согласно закону Шмида, активность систем скольжения (СС) определяется из равенства сдвигового и критического напряжения. В соответствие с законом Шмида существуют случаи, когда активно более пяти СС, при этом с физической точки зрения все эти системы равноправны. Попыткам решения проблемы неопределённости посвящено значительное число публикаций.

Целью рассматриваемой работы является критический анализ известных методов решения проблемы неопределённости и разработка нового итерационного подхода для исключения неопределённости в УП моделях.

Предлагаемая итерационная схема основана на разделении активных систем скольжения на два непересекающихся подмножества  $D$ ,  $U$ . Итерационно до достижения сходимости переопределяется разделение активных систем скольжения на множества  $D$ ,  $U$ , после чего для каждого подмножества отдельно определяются скорости сдвигов через разрешения соответствующих систем линейных уравнений. Для определения скоростей сдвигов по системам скольжения множества  $D$  используется система уравнений модели Линя, для множества  $U$  – кососимметричное проецирование (с использованием соответствующего диадного базиса систем скольжения) отнесенной к множеству  $U$  составляющей неупругой несимметричной меры скорости деформации. Сходимость итерационной схемы показана на частном случае одноосного нагружения монокристалла, при котором скорости сдвигов по 8 системам скольжения оказываются равными.

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-2024-0002).

### Литература

- [1] Линь Т.Г. Физическая теория пластичности // Проблемы теории пластичности. Сер. Новое в зарубежной механике. Вып. 7.– М.: Мир, 1976. – С. 7–68.
- [2] Taylor G.I. Plastic strain in metals // J. Inst. Metals. – 1938. – Vol. 62. – P. 307–324.
- [3] Bishop J.F., Hill R. A theory of the plastic distortion of a polycrystalline aggregate under combined stresses // Phil. Mag. Ser.7. – 1951a. – Vol. 42, № 327. – P. 414–427. DOI: 10.1080/14786445108561065
- [4] Bishop J.F.W., Hill R. A theoretical derivation of the plastic properties of a polycrystalline face – centered metal // Phil. Mag. Ser.7. – 1951b. – Vol. 42, № 334. – P. 1298–1307. DOI: 10.1080/14786444108561385

## **ДИНАМИКА СВЕРХАКТИВНЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОТЕНЦИАЛАХ**

Голдобин Д.С.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

<sup>3</sup>*Пермский национальный исследовательский государственный университет, Пермь*  
[Denis.Goldobin@gmail.com](mailto:Denis.Goldobin@gmail.com)

Динамика броуновских частиц в жидкости является существенно диссипативной и часто рассматривается в рамках так называемого «передемпфированного» предела. Для активных броуновских частиц, способных к самодвижению, в соответствующем пределе типично движение с заданной по модулю скоростью, направление которой подвержено тепловым флуктуациям и восприимчиво к внешним силам, связанным с макроскопическими полями в среде. Для «частиц» разной природы — будь то Янус- частицы или капли, микроорганизмы в жидкости, организмы в газе («сухие» броуновские частицы) — распространены ситуации, когда влияние силы самодвижения велико по сравнению с тепловыми флуктуациями и влиянием сил, обусловленных внешними макроскопическими полями. Справедливо так называемое приближение «сверхактивной» броуновской частицы (СБЧ). В этом пределе диссипативные силы настолько велики (вязкое сопротивление среды уравнивает силу самодвижения), что часть степеней свободы оказывается «вымороженной», а динамика, связанная с остающимися степенями свободы, становится консервативной.

Динамика СБЧ в поле консервативных внешних сил оказывается гамильтоновой, однако есть существенная специфика: значения гамильтониана не параметризуют множество траекторий — физический смысл имеют только траектории с нулевым значением гамильтониана [1,2]. Такая ситуация не является уникальной: формализм, описывающий траекторию СБЧ в потенциальном поле, может быть введен в геометрической оптике для описания луча света в среде с неоднородным полем коэффициента преломления. Такое специфическое математическое описание отражает нетривиальную динамику СБЧ в потенциальных ямах: траектории захваченных частиц являются квазипериодическими, а траектории выхода из ямы являются хаотическим. Для глубоких потенциальных ям последние формируют фрактальную структуру, разделяющую острова регулярного квазипериодического поведения. В силу обратимости уравнений во времени, все частицы, налетающие на потенциальную яму, рано или поздно выходят из нее, однако из-за хаотического характера траекторий входа/выхода время выхода оказывается экспоненциально большим и его зависимость от прицельных параметров имеет тонкую структуру. При наличии вращательной симметрии потенциала в системе возможен еще один интеграл движения, подобный угловому моменту: этот интеграл оказывает существенное влияние на динамику СБЧ, однако геометрический характер этого влияния радикально отличается от такового для бездиссипативной динамики материальной точки в центральных полях.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-12-00180).

### Литература

- [1] Aranson I.S., Pikovsky A. Confinement and Collective Escape of Active Particles // Physical Review Letters. – 2022. – V. 128. – P. 108001.  
[2] Pikoisky A. Deterministic active particles in the overactive limit // Chaos. – 2023. – V. 33. – P. 113114.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПРОМЫВКЕ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ ЧЕРЕЗ ПОЛЫЕ ШТАНГИ

Гольцов Е.С.<sup>1</sup>, Труфанова Н.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный университет, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный технический университет, Пермь

[evgeny.goltsov@yandex.ru](mailto:evgeny.goltsov@yandex.ru), [trufanova@pstu.ru](mailto:trufanova@pstu.ru)

Эксплуатация нефтяных скважин с повышенными асфальто-смоло-парафиновыми (АСПО) отложениями распространены в большинстве районах страны. Основные методы борьбы с АСПО: тепловые [1], механические, химические. К наиболее распространенным тепловым способам относятся способ промывки скважины через затрубное пространство и через полые штанги глубинного насоса (ШГН). В работе рассмотрен тепловой метод, в котором используется промывка нефтяной скважины горячим теплоносителем, через полые штанги глубинного насоса. Важным преимуществом данной технологии в сравнении с технологией промывки скважины через затрубное пространство является снижение тепловых потерь в окружающую среду, при этом повышается плотность теплового потока в зоне удаления АСПО. Использование теплоизоляционного слоя на внутренней поверхности штанги позволяет снизить интенсивность тепловых потоков в верхних частях штанги и доставить горячий теплоноситель на необходимую глубину. Применение метода математического моделирования даёт возможность оценить эффективность промывки теплоносителем с наименьшими затратами.

Основными задачами в рассматриваемой технологии промывки являются определение температуры и расхода теплоносителя и оценка влияния технологических характеристик работы скважины на эффективность промывки. Поставленные задачи решались с помощью метода математического моделирования.

Рассматривалась осесимметричная, стационарная математическая модель процессов теплообмена в каналах полых штанги и канале НКТ в условиях турбулентного режима течения [2]. Численная реализация осуществлялась методом конечных элементов в программном продукте ANSYS Fluent.

В работе были получены распределения полей скоростей и температур в скважине и полых штангах при промывке нефтяной скважины горячим теплоносителем. Приведены распределения температуры на внутренней стенке НКТ по глубине скважины при различных параметрах, таких как время промывки, вид теплоносителя (нефть, вода), расход теплоносителя для штанг с и без изоляционного слоя. Приведены графики зависимости распределения температуры на внутренней стенке НКТ при различной длине теплоизоляционного слоя.

Отмечено, что наличие теплоизоляционного слоя существенно увеличивает эффективность промывки скважины горячим теплоносителем через полые штанги. Это обусловлено тем, что теплоноситель имеет более высокую температуру при выходе из муфты.

### Литература

1. Kostarev N.A., Trufanova N.M. Control of the Thermal Processes in an Oil Well with a Heating Cable // Russian Electrical Eng. 2017. V. 88. №. 11. P. 755. [Костарев Н.А., Труфанова Н.М. Управление тепловыми процессами в нефтяной скважине с помощью греющего кабеля // Электротехника. 2017. № 11. С. 60.]
2. Мартюшев Д.А. Моделирование и прогнозирование отложений асфальтеносмолопарафиновых веществ в нефтедобывающих скважинах // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 4. С. 86-92.

## **ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА СТАБИЛИЗАЦИИ МАРТЕНСИТА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПРИВОДА С РАБОЧИМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

Горбаченко Д.Ф.<sup>1,2</sup>, Беляев Ф.С.<sup>1,2</sup>, Евард М.Е.<sup>1</sup>, Волков А.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

*[daniilgorbachenko@gmail.com](mailto:daniilgorbachenko@gmail.com), [belyaev\\_fs@mail.ru](mailto:belyaev_fs@mail.ru)*

Сплавы с памятью формы (СПФ) обладают уникальными механическими свойствами, позволяющими им восстанавливать деформацию при нагреве даже под внешней нагрузкой. Это делает их перспективными для проектирования приводов, в частности торсионных, где используются элементы из СПФ.

В данной работе представлены результаты моделирования рабочего цикла торсионного привода с использованием микроструктурной модели. Цикл реализовывался следующим образом: 1. Образец предварительно деформировался путём активного деформирования в мартенситном состоянии с последующей разгрузкой; 2. Термоциклирование проводилось через интервал температур мартенситного превращения при заданных условиях закрепления (один конец образца жёстко зафиксирован, а для другого задавалась определённая жесткость).

Для изучения влияния эффекта стабилизации мартенсита (ЭСМ) проведено моделирование в двух случаях: с учётом ЭСМ и без него. Проанализированы зависимости восстанавливаемой деформации от интервала температур при нагревании. Полученные результаты показывают, что учёт ЭСМ влияет на смещение температур обратного превращения и работоспособность привода, особенно при нагреве до температур, близких к завершению обратного превращения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00361, <https://rscf.ru/project/25-21-00361/>

## ОПТОВОЛОКОННЫЙ АМПЛИТУДНЫЙ ДАТЧИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА 5СВ

Гордеева А.И.<sup>1</sup>, Нурмухаметов Д.И.<sup>1,2</sup>, Пономарёв Р.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
danur95@yandex.ru, gordeeva@psu, rsponomarev@gmail.com

Измерение магнитных и электрических полей является важной составляющей процесса разработки электромагнитных устройств. На сегодняшний день наибольшую популярность получили микрорезонансные оптоволоконные датчики благодаря высокой скорости передачи данных, электрической пассивности, устойчивости к электромагнитным помехам, простоте изготовления, низкой стоимости и компактным размерам [1]. В некоторых случаях для создания чувствительных элементов таких датчиков применяют жидкие кристаллы (ЖК), которые меняют свои оптические свойства под действием внешних электромагнитных или температурных полей.

В настоящей работе приведены результаты разработки и экспериментально исследования чувствительности амплитудного оптоволоконного датчика электромагнитного поля, созданного на основе микронной полости [2], заполненной жидким кристаллом 5СВ. Молекулы используемого нематика под действием внешнего магнитного поля значением  $H$  выше критического ориентируются по полю, меняя свои оптические свойства. Для проверки рабочее тело датчика помещалось в область однородного магнитного поля, создаваемого двумя соосно расположенными постоянными кольцевыми магнитами. С помощью датчика Холла тесламетром для используемой системы в трех точках пространства была измерена индукция магнитного поля, рассчитаны значения напряженности.

В ходе эксперимента лазерное излучение длиной волны 1550 нм от перестраиваемого узкополосного источника при помощи циркулятора направлялось в исследуемую полость. Оптический сигнал, прошедший через волокно и полость и отраженный от границы раздела ЖК-воздух, детектировался оптическим спектроанализатором. Визуальный контроль за перемещением и прозрачностью ЖК осуществлялся видеокамерой.

Эксперименты показали, что различное позиционирование полости относительно магнитов не влияло на форму и положение пиков оптического спектра. На графиках наблюдался незначительный рост амплитуды мощности отраженного сигнала с ростом напряженности магнитного поля. При этом большее значение амплитуды детектировалось при использовании полости с меньшим диаметром устья. Также необходимо отметить тот факт, что визуально полость оставалась прозрачной во всех исследуемых точках положения чувствительного элемента в системе магнит-волокно. Эффект можно объяснить механическим выстраиванием вектора директора нематика вдоль стенок полости при её заполнении. Замена ЖК на холестерик возможно устранил данный эффект, что позволит увеличить чувствительность датчика.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания FSNF-2024-0001.

### Литература

[1] Chen W., et. al. Recent Progress of Optical Fiber Fabry-Perot Sensors // Acta Optica Sinica. – 2018. – V. 38(3). – P. 0328010.

[3] Нурмухаметов Д.И., др. Формирование открытой полости на торце оптического волокна, как элемент чувствительной части универсального датчика Фабри-Перо // Фотон-Экспресс – 2023. – 5. С. 189.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ВЫГОДНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ МНОГОГРАНУЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ В СТАТИЧЕСКОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Грохотова Е.В.<sup>1</sup>, Соловьева А.Ю.<sup>1</sup>, Елфимова Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург  
[e.v.grokhotova@urfu.ru](mailto:e.v.grokhotova@urfu.ru)

В работе исследуется влияние ориентации вектора внешнего магнитного поля  $h$  на суммарный магнитный момент многогранульной частицы (МГЧ) при поиске состояния, отвечающему минимуму энергии. Такой подход соответствует определению выгодного положения МГЧ в пространстве при фиксированном направлении  $h$ . Поскольку после агрегирования магнитных частиц в среде с малой вязкостью сформированные кластеры способны менять свое расположение, сохраняя общую структуру, возникает вопрос выявления выгодного направления внешнего поля для получения наибольшей реакции всей системы. Для описания указанной модели производилось компьютерное моделирование методом Монте-Карло.

Предполагалось, что вращение МГЧ в пространстве происходит как единое целое, позиции гранул относительно системы не меняются. Гранулы представляют собой однодоменные сферические суперпарамагнитные наночастицы с одноосной магнитной анизотропией. Так как на ориентацию магнитных моментов влияет не только поле и диполь-дипольные взаимодействия, но и магнитная анизотропия гранул, то возник вопрос в определении эффективного ориентационного упорядочивания осей легкого намагничивания. В связи с этим направление осей бралось согласно формируемым структурам магнитных моментов МГЧ в случае отсутствия поля, когда их направления определялись только за счет взаимодействия с соседними гранулами. После этого с помощью компьютерного моделирования определялось предпочтительное направление поля следующим образом: одним из равновероятных способов осуществлялся сдвиг магнитного момента или поворот вектора внешнего поля. Переход к следующему состоянию производился по алгоритму Метрополиса. После установившееся направление  $h$  фиксировалось и дальнейший анализ был связан с намагничиванием неподвижной МГЧ в направлении магнитного поля согласно Неелевскому механизму.

Показано, как различные расположения частиц влияют на характер ориентации внешнего поля. С этой целью приводятся результаты, полученные для различных типов систем, образованных четырьмя магнитными гранулами: одномерный вариант выстроенных в цепочку частиц, образованное в плоскости кольцо и объемная структура-тетраэдр.

Проведен сравнительный анализ проекции суммарного магнитного момента на различные направления поля с энергетически выгодной кривой намагничивания, соответствующей эффективному полю  $h$ . Также определен вклад каждого типа энергий (диполь-дипольной, Неелевской и Зеемана) в намагничивание МГЧ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-72-00115.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКСИДНОГО СЛОЯ НА РАСТЕКАНИЕ ЦИНКОВОГО ПРИПОЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ С УЧЕТОМ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Груздь С.А., Шутов И.В., Салтыков И.Р.

Удмуртский государственный университет, Ижевск  
[lilyna@mail.ru](mailto:lilyna@mail.ru)

В работе представлены результаты комплексного исследования, посвященного изучению диффузионных процессов, протекающих при технологии наплавки. В качестве материала пластины используется алюминиевый сплав АМг6, в качестве припоя сплав на основе цинка. Лабораторным испытаниям подвергали алюминиевую пластину, на которую был нанесен цинковый припой [1]. На первом образце после плавления припоя слой оксида с алюминиевой пластины снимался под каплей припоя при помощи механического лужения пластинкой из поликристаллического  $Al_2O_3$ . На втором образце оксидный слой не удалялся. После выдержки при температуре  $430^\circ C$  в течении часа пластины охлаждались. На полученных образцах в обоих случаях наблюдалось диффузионное проникновение цинка в алюминиевую подложку. На образце без удаления оксидного слоя наблюдалось диффузионное проникновение цинка в алюминиевую подложку и дальнейшее растекание его под слоем оксида на расстояние до 10 мм от центра капли припоя по поверхности образца. На образце с удаленным оксидным слоем в месте контакта капли припоя и пластины наблюдалось активное растекание цинкового припоя по поверхности пластины под оксидным слоем на расстояние до 18 мм. Проникновение цинка вглубь пластины наблюдалось не более чем на 100 мкм.

На основе поставленной задачи была построена математическая модель многофазного течения с использованием метода деформируемой границы ALE-метод (Эйлера-Лагранжа) [2]. Задачи решалась в изотермической постановке при температуре выдержки. В представленную модель входят уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости и уравнение переноса концентраций. Изменение формы поверхности капли припоя при смачивании пластины происходит ALE методом. Для получения точных решений при малых контактных углах смачивания используется перестраиваемая сетка. Твердая подложка рассматривается в приближении высоковязкой среды.

При проведении численного эксперимента произведена верификация на результатах лабораторных испытаниях скорости растекания припоя и его формы капли. Произведена оценка величины коэффициента диффузии в поверхностных слоях пластины, который согласно полученным данным на несколько порядков выше объемной диффузии. Представлены результаты серии численных расчётов области растекания припоя с наличием оксидного слоя различной толщины. Произведена оценка величины коэффициента диффузии цинка в поверхностном слое пластины.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00413)

### Литература

- [1] Шутов И.В., Кривилев М.Д., Королев М.Н. Изучение разрушения паяных соединений сплава АМг6 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – т.26, №1 – с. 42-49.
- [2] Груздь С.А., Кривилев М.Д., Самсонов Д.С. Математическая модель процесса смачивания вертикальной стенки при пайке твёрдым припоем сколов и трещин космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. – 2022. – №2. – с. 66–74.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРА ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гурджиев А.В., Третьяков М.П.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
*gurd\_20@mail.ru, cem\_tretyakov@mail.ru*

Методы неразрушающего контроля (НК) позволяют оценить характер внутренних повреждений структуры слоисто-волокнутого полимерного композиционного материала (ПКМ), определить их характерные размеры и местоположение. Методы НК являются средствами исследования материала конструкции для определения её остаточного ресурса [1]. Особенно НК актуален при диагностике объектов, работающих в условиях комбинированных механических воздействий (совместное или последовательное действие на материал как минимум двух сил), когда технически сложно оценить их влияние на структуру материала [2].

Наиболее распространёнными типами дефектов в ПКМ являются расслоения (трещины), нарушение адгезии матрицы и волокна, микротрещины и пористость. В работе были использованы ультразвуковые методы НК, которые комплексно позволяют выявлять эти внутренние дефекты структуры.

Целью работы являлось получение закономерностей в характере повреждений ПКМ при циклическом и квазистатическом растяжении с дополнительными вибрациями на кручение.

Комбинированными усилиями проведено воздействие на плоские образцы с V-образными краевыми концентраторами. Образцы были изготовлены из слоисто-волокнутого тканого углепластика и стеклопластика. Для углепластика рассмотрено направление слоёв укладки под углами  $0^\circ$  и  $45^\circ$  относительно оси нагружения. Механические испытания проводились с применением универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системы Instron 8802. Для исследования внутренней структуры материалов при механическом деформировании образцов применялись ультразвуковые теневой и эхо-импульсный методы НК. Проведена оценка зон распределения дефектной структуры в образцах после испытаний на основании уровня ультразвукового сигнала на рабочих частотах пьезоэлектрических преобразователей 0,1 МГц; 1,25 МГц; 5 МГц. Для численной оценки степени повреждённости  $\eta$  проведены расчёты доли дефектной структуры в образце. Построены зависимости степени повреждения образцов от числа циклов предварительного растяжения при разной истории механического нагружения.

Полученные результаты позволили оценить действие циклического и квазистатического нагружения с дополнительными вибрациями на кручение на процессы накопления повреждений в ПКМ. Это подтверждает эффективность использования ультразвуковых методов НК как для выявления несплошностей и определения их размеров, так и для идентификации их типа в ПКМ.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском университете за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00760 <https://rscf.ru/project/25-29-00760/>.

### Литература

- [1] Потапов, А. И. Методы неразрушающего контроля и диагностики прочности изделий из полимерных композиционных материалов / А. И. Потапов, В. Е. Махов // Дефектоскопия. – 2018. – № 3. – С. 7-19.
- [2] Tableau N. et al. Multiaxial loading on a 3D woven carbon fiber reinforced plastic composite using tensile-torsion tests: Identification of the first damage envelope and associated damage mechanisms // Composite Structures. – 2019. – Vol.227. – P. 111305.

## ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Гусев Г.Н., Горбач С.К.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[gusev.g@icmm.ru](mailto:gusev.g@icmm.ru)

Строительство и эксплуатация подземных магистральных трубопроводов на подрабатываемых территориях требуют решения множества технически сложных задач. Подземная разработка пластов полезных ископаемых приводит к значительным деформациям в вышележащем грунтовом массиве, провоцируя опасные деформационные процессы [1-3]. Области сдвижения земной поверхности достигают размеров в несколько километров и разными своими частями оказывают влияние на попадающие в эту зону линейные сооружения, к которым относятся в том числе и магистральные трубопроводы. Задача оценки рисков и параметров безопасной эксплуатации осложняется тем, что у области сдвижения есть несколько зон с различными по знакам и амплитуде полями деформации, а протяженный линейный строительный объект, попадающий в зону влияния таких полей, испытывает сложное деформированное состояние. Большие диаметры трубопроводов, давление среды в несколько десятков атмосфер, вариации физико-механических свойств как материала труб, так и окружающего грунтового массива только усложняют оценку параметров безопасной эксплуатации.

В настоящем исследовании предложена методика оценки деформированного состояния подземных магистральных трубопроводов, выполненных из различных материалов. Предложен подход, который позволит на основе данных о параметрах сдвижения земной поверхности в зоне расположения магистрали трубопровода и данных о физико-механических параметрах объекта прогнозировать его деформированное состояние в зависимости от условий подработки массива нижележащих грунтов. На основе результатов численного конечно-элементного моделирования осуществлена оценка деформаций грунтового массива, которые приводят к потере несущей способности различных типов подземных магистральных трубопроводов. Произведены вычисления для ряда основных конструктивных материалов и режимов эксплуатации. Задача решалась как в линейной постановке, так и с учетом нелинейного деформационного поведения материала труб и возможности контактного взаимодействия трубы с грунтовым массивом. Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы №124040500016-9.

### Литература

- [1] Ravet F. Transport Infrastructure Geohazard Risk Monitoring with Optical Fiber Distributed Sensors: Experience with Andean and Arctic Pipelines – FMGM 2018 Conference, July 2018.
- [2] Kalisz P., Zięba M. Impact of mining exploitation on pipelines – Acta Montanistica Slovaca, Ročník 19(2014), číslo 3, 111-117.
- [3] Rai A., Ahmad Z., Hasan M.J., Kim J.-M. A Novel Pipeline Leak Detection Technique Based on Acoustic Emission Features and Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test – Sensors, 2021, 21, 8247. – 13 p.

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АРМОКАМЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

Гусев Г.Н., Корепанов В.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[kvv@icmm.ru](mailto:kvv@icmm.ru), [gusev.g@icmm.ru](mailto:gusev.g@icmm.ru)

Процессы, связанные с добычей ископаемых и выемкой их из недр, оказывают влияние на вышележащие грунтовые массивы, и как следствие, приводят к искажению земной поверхности [1]. Это вызывает существенную деформацию стоящих на поверхности зданий и может привести к образованию и развитию трещин вплоть до разрушения самих сооружений. Проблема обостряется тем, что в зону воздействия попадают целые группы сооружений, сотни домов и прочих объектов городской инфраструктуры. Для оценки безопасной эксплуатации такого рода сооружений обычно используются различные варианты систем деформационного мониторинга [2], но не в случаях, когда в зону влияния попадают целые кварталы и микрорайоны. Поэтому актуальной является задача оценки деформированного состояния зданий и сооружений, а также их остаточного ресурса на основе анализа доступных данных, в том числе геодезических или спутниковых наблюдений за деформациями грунтов, на которых находятся подрабатываемые сооружения.

В данном исследовании предложена численно-экспериментальная методика оценки деформированного состояния армокаменных (кирпичных) сооружений, которые попали в зону подработки. В работе рассматриваются различные модели поведения армокаменного здания и деформируемого грунтового основания, а также варианты их контактного взаимодействия. Определены деформации грунта в окрестности сооружения, которые являются критическими и приводят к различным уровням образования и развития трещин в кирпичной кладке стен. Показано, что уровень деформаций и их рост в несущих элементах армокаменных зданий существенным образом определяется выбором варианта взаимодействия конструктивных элементов в системе с грунтовым основанием. Также показано, что передача деформаций от грунтового массива сооружению существенным образом определяется свойствами самого грунтового массива. На основе рассмотренных моделей предложены критерии оценки и построены зависимости осредненных деформаций для несущих элементов кирпичного здания от деформации грунтового основания в окрестностях фундамента. Предложена методика оценки деформированного состояния различных армокаменных сооружений по данным геодезических наблюдений за деформациями грунта. Приведены примеры анализа ряда зданий для г. Березники Пермского края.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы №124040500016-9.

### Литература

- [1] Samsonov S., Baryakh A. Estimation of Deformation Intensity above a Flooded Potash Mine Near Berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR Interferometry // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12(19). – p. 3215.
- [2] Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В. Результаты многолетних наблюдений неравномерных осадок зданий, находящихся на территории Верхнекамского калийного месторождения в г. Березники // Изв. УГГУ. – 2022. – № 3(67). – с. 80–89.

## СТРУКТУРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ РАДИАЦИОННО-ОКИСЛИТЕЛЬНОМ СТАРЕНИИ

Далинкевич А.А.<sup>1,2</sup>, Фомин Л.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Москва

<sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Москва  
[dalinkevich@yandex.ru](mailto:dalinkevich@yandex.ru), [fleonid1975@mail.ru](mailto:fleonid1975@mail.ru)

Представлены результаты изучения кинетики снижения прочности трех видов полимерных волокон (полиэтиленовых, полипропиленовых и полиамидных) [1 – 3] при облучении на воздухе [4] рентгеновским излучением в интервале мощностей поглощенной дозы 0,02-15 Гр/с. Показано, что снижение прочности облученных волокон происходит до некоторого предельного значения, зависящего от мощности дозы и может быть описано в терминах кинетики необратимой и обратимой реакций псевдопервого порядка. Рассмотрена структурно-кинетическая модель радиационно-окислительного старения волокон, в которой учитывается противоположное влияние деструкции и сшивания проходных макромолекул на прочность ориентированного полимера (волокна) и особенности структуры ориентированного полимера. Структурная схема и снижение относительно прочности нитей полимера после облучения на воздухе показаны на рис. 1 и 2, соответственно.

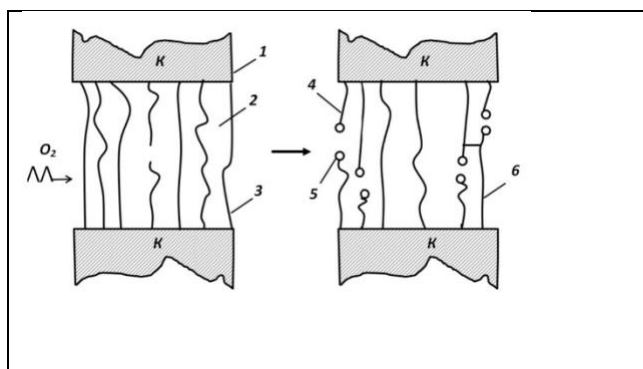


Рис. 1. Структурная схема радиационно-окислительного старения ориентированного аморфно-кристаллического полимера.

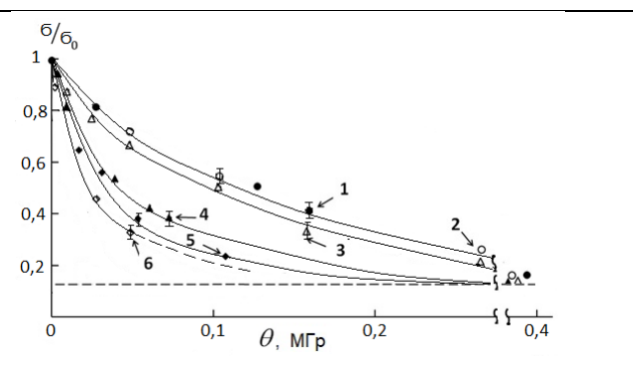


Рис. 2. Снижение относительной прочности при растяжении нитей ПЭ после облучения на воздухе при различных мощностях дозы

Разработанная модель хорошо согласуется с экспериментом и позволяет описать изменение прочности ориентированного полимера и однонаправленного композита на их основе при одновременном протекании процессов радиационно-окислительной деструкции и сшивания цепей.

### Литература

- [1] Dalinkevich A.A., Piskarev I.M., Fomin L.V., Nenasheva T.A. Strength kinetics of oriented polypropylene during radiation-oxidative aging // High Energy Chemistry. 2023. Vol. 57. №3, Pp. 253 – 258.
- [2] Далинкевич А.А., Пискарев И.М., Фомин Л.В., Ненашева Т.А. Кинетика радиационно-окислительного старения ПЭВП-волокон при одновременном протекании деструкции и сшивания макромолекул // Химия высоких энергий. 2024. Т.58. №1. С. 127-134.
- [3] Далинкевич А.А., Пискарев И.М., Фомин Л.В., Ненашева Т.А. Кинетика радиационно-окислительного старения полиамидных волокон и композита на их основе // Химия высоких энергий. 2024. Т. 58. №4. С. 77 – 83.
- [4] Попов А.А., Рапопорт Н.Я., Заиков Г.Е. Окисление ориентированных и напряженных полимеров. М., Химия, 1987, С.229.

## ДИНАМИКА ФРОНТА ПАРА ПОД ЛЕВИТИРУЮЩЕЙ КАПЛЕЙ

Демин В.А.<sup>1</sup>, Демин Ф.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[demin@psu.ru](mailto:demin@psu.ru), [deminfv@yandex.ru](mailto:deminfv@yandex.ru)

Изучение физических процессов, связанных с поведением капельных объектов, имеет большое прикладное значение. Особенно часто приходится иметь дело с капельными системами в теплофизике [1,2]. Процессы горения различных видов топлива (включая многофазные), работа систем охлаждения, физико-химические процессы перемешивания и, наоборот, разделения смесей на компоненты: в каждой из этих областей, так или иначе, приходится сталкиваться с капельными системами. Ансамбли капель образуются при искусственном диспергировании жидкости [3]. Также образование капель и их поведение практически всегда сопутствуют процессам кипения. В этом случае капли появляются как результат гидродинамической неустойчивости больших объемов жидкости в результате их разрушения на многочисленные фрагменты.

В настоящей работе рассматривается капля миллиметровых размеров над гладкой подложкой, находящаяся в состоянии левитации за счет нагрева снизу и сопутствующего испарения [4]. Расчет избыточного давления под каплей производится на основе уравнений гидродинамики для двухфазных сред (воздух и пар). В осесимметричном приближении проведен расчет полей скорости воздушно-паровой смеси, а также концентраций воздуха и пара под каплей в режиме стационарной левитации. Изучена динамика фронта пара под левитирующей каплей. Показано, что капля, несмотря на достаточно малую интенсивность испарения может парить на некотором расстоянии от подложки по причине того, что избыточное давление под каплей превышает адгезионные силы, заставляющие каплю прилипнуть к подложке.

### Литература

- [1] Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат. 1979. – 416 с.
- [2] Феоктистов Д.В., Кузнецов Г.В., Абедтазехабади А., Орлова Е.Г., Бондарчук С.П., Дорожкин А.В. Повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких температур // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 4. С. 72-88.
- [3] Ajaev V.S., Kabov O.A. Levitation and self-organization of droplets // Annual Review of Fluid Mechanics. 2021.53:203-25. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-030620-094158>.
- [4] Кнаке О., Странский И.Н. Механизм испарения // Успехи физических наук. Т. LXVIII. Вып. 2. 1959. С. 261-305.

## ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСРАНЕНИЯ ПАРОВ КРЕМНИЯ В РАЗРЕЖЕННОЙ СРЕДЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА

Демин В.А.<sup>1</sup>, Демина Т.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

<sup>2</sup>Институт Механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

[demin@psu.ru](mailto:demin@psu.ru), [demina-tatyana99@yandex.ru](mailto:demina-tatyana99@yandex.ru)

Метод парофазного силицирования, а также различные его вариации активно используются при производстве углеродных композиционных изделий [1]. Однако до последнего времени весьма актуальным был вопрос об описании доставки паров кремния от источника до образца. Простейшие расчеты, выполненные на основе классического уравнения диффузии, не позволяли количественно получать хоть какие-то близкие по значению величины массопотока за разумное время процесса. Значение массопотока в изделие является ключевой характеристикой при описании данного процесса, поэтому приходится заключить, что имеет место качественное несоответствие этого классического уравнения диффузии наблюдаем явлениям.

В [2] впервые было выведено уравнение нелинейной диффузии, учитывающее эффективно дополнительный конвективный массоперенос в рабочей полости в рамках модели осредненной фильтрации паров кремния через среду остаточного газа, роль которого играет инертный газ аргон. Оказалось, что полученное уравнение нелинейной диффузии, имеет точные одномерные стационарные решения для систем с прямоугольной [1], цилиндрической [3] и сферической симметрией.

Однако, не меньший практический интерес представляет динамика концентрационного фронта и установление распределения концентрации кремния в рабочей полости в трехмерной постановке. Расчеты были выполнены методом конечных разностей [4]. Авторский программный код был реализован на языке программирования Фортран-90. Показано, что несмотря на эффект рассеяния от локализованного источника, пары кремния в стационарных условиях присутствуют во всем объеме реторты и их концентрация заметно убывает только вблизи образца, на поверхности которого идет поглощение за счет конденсации или химической реакции. Таким образом, расчеты показывают, что даже в трехмерной постановке на изделии имеет место значительный градиент концентрации кремния, более чем достаточный для силицирования пористого углеродного материала.

Работа выполнена в рамках государственного задания, рег. номер темы № 124021600038-9.

### Литература

- [1] Бушуев В.М., Лунегов С.Г., Бушуев М.В. Разработка комбинированного метода силицирования крупногабаритных изделий из УУКМ, базирующегося на альтернативном жидкофазном методе и применении процесса капиллярной конденсации паров кремния // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2015, № 40, с. 44-63.
- [2] Демин В.А., Демина Т.В., Марышев Б.С. Физико-математическая модель переноса газообразного кремния в ходе высокотемпературного силицирования углеродных композитных материалов // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 3, с. 48-55.
- [3] Demin V.A., Demina T.V., Zinurova V.E. Penetration of a silicon vapor through residual gaseous medium during siliconizing of a carbon composite material // Multiphase systems. Vol. 19 (2024). No. 3, pp. 103-111. DOI: 10.21662/mfs2024.3x021.
- [4] Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. – 616 с.



## ДИФфуЗИЯ ПАВ В НЕРАВНОВЕСНОЙ СИСТЕМЕ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ МАКСИМАЛЬНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ

Денисова М.О., Костарев К.Г., Торохова С.В.

Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь  
[mod@icmm.ru](mailto:mod@icmm.ru), [kostarev@icmm.ru](mailto:kostarev@icmm.ru)

Проведено экспериментальное изучение влияния химического потенциала на массообменные процессы в жидких системах с межфазной границей. Исследование выполнено на примере массообмена ПАВ между каплей и окружающей средой в условиях максимального подавления свободно конвективного движения (в тонком горизонтальном слое). Система несмешивающихся жидкостей образована водой и смесью бензола с хлорбензолом, диффундирующий ПАВ – уксусная кислота, обладающая существенно разной энергией сольватации в контактирующих жидкостях. Визуализация течений и полей концентраций ПАВ в капле и окружающей среде выполнена с помощью лазерной интерферометрии, что позволило проследить их эволюцию в ходе диффузионного процесса [1]. Определены характерные времена экстракции ПАВ в зависимости от направления его диффузии, структура и скорость растространения концентрационного поля от капли в зависимости от концентрации ПАВ (рис. 1) и соотношения химических потенциалов в капле и окружающей жидкости. Для случая развития химической реакции нейтрализации рис. 2 (в качестве окружающей жидкости вместо воды использован водный раствор гидроксида натрия) концентрационное поле вокруг капли приобретает многовихревую структуру. Для всех рассмотренных случаев оценена роль гравитационных эффектов и возникающей конвекции Марангони.



Рис 1. Интерферограмма поля концентрации при диффузии уксусной кислоты  $C_0=1.74$  моль/л в каплю воды с  $D_0=6.1$  мм из смеси бензолов в горизонтальном слое. Время с момента создания капли  $t=300$  с

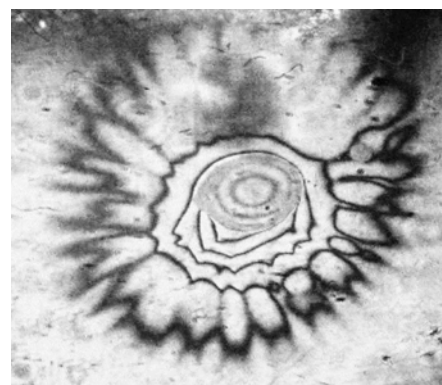


Рис 2. Интерферограмма концентрационного поля вокруг капли, на внешней поверхности которой развивается реакция нейтрализации вследствие диффузии уксусной кислоты в горизонтальный слой водного раствора гидроксида натрия  $C_{01}=1.6$  моль/л.  $C_0=1.74$  моль/л,  $D_0=4.78$  мм,  $t=418$  с

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки высшего образования РФ (тема № 121031700169-1).

### Литература

[1] Denisova, M., Kostarev, K., Peculiarities of Mass Transfer Between the Droplet With a Chemical Reaction On Its Surface and the Surrounding Medium // Microgravity Sci. Technol.– 2022. – vol. 34, № 84.

## РАЗВИТИЕ РЕАКЦИИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ В КАПЛЕ, ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПАВ ИЗ ЕГО ОДНОРОДНОГО РАСТВОРА.

Денисова М.О., Костарев К.Г.

Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь  
[mod@icmm.ru](mailto:mod@icmm.ru), [kostarev@icmm.ru](mailto:kostarev@icmm.ru)

Экспериментально изучено развитие реакции нейтрализации в неподвижной капле цилиндрической формы, экстрагирующей поверхностно-активный реагент из окружающей смеси в вертикальной ячейке Хеле-Шоу. В качестве базовой жидкости капли выбран водный раствор гидроксида натрия; окружающая среда представляла собой смесь бензола и хлорбензола с уксусной кислотой, последняя выполняла роль экстрагируемого реагента с поверхностно-активными свойствами. Продукты реакции – вода и водорастворимый ацетат натрия. В исследовании использован новый метод, который основан на одновременной визуализации поля показателя преломления света и распределения степени кислотности растворов исходных реагентов и продуктов реакции в капле. Для реализации этого подхода были применены соответственно, интерферометр Физо и и pH индикатор, вводимый в каплю непосредственно перед началом опыта.

Рассмотрены два варианта осуществления реакции – с развитием конвекции Марангони и без нее. Выявлена структура течений и полей концентрации в капле и ее окрестности, прослежена их эволюция (рис. 1). Определены характерные времена процесса экстракции. Обнаружено, что возникающая конвекция Марангони имеет колебательный характер и продолжается после завершения реакции. Как и ожидалось, формирование капиллярного движения интенсифицирует развитие химической реакции в объеме капли.

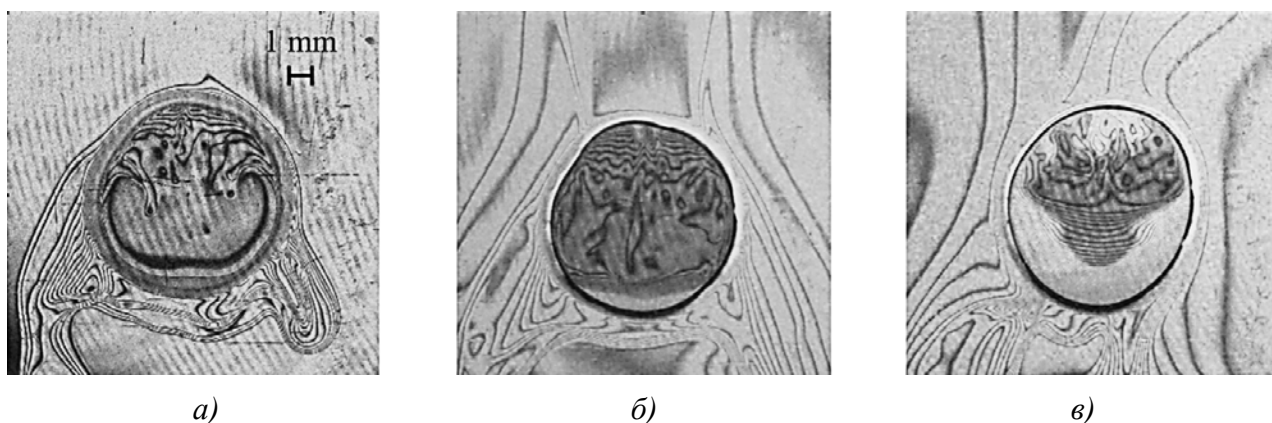


Рис.1 Эволюция совместного поля показателя преломления света и распределения раствора гидроксида натрия в реагирующей капле, поглощающей уксусную кислоту из смеси бензолов.  $C_{01} = C_{02} = 1.0$  моль/л. t, с: a - 36; b - 98; c – 360

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта (Соглашение № 075-15-2024-535 от 23 апреля 2024 г.).

## УПРУГИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ГЕЛЕЙ

Денисюк Е.Я.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[denisyuk@icmm.ru](mailto:denisyuk@icmm.ru)

Полимерный гель рассматривается как смесь, представляющая собой высокоэластичный упругий материал и растворенную в нем жидкость (растворитель) [1–3]. На основе обобщенной модели Муни-Ривлина предложено выражение свободной энергии, описывающее деформационное поведение и термодинамические свойства полимерных гелей. В данной модели полагается, что «константы» Муни-Ривлина зависят от концентрации растворенной в полимере жидкости. Из этого выражения получены определяющие соотношения для тензора напряжений, химического потенциала растворителя и осмотического тензора напряжений. На их основе выполнено экспериментальное исследование деформационных свойств набухших в растворителе сетчатых эластомеров различной химической природы. В частности, изучена зависимость упругих свойств эластомеров от концентрации растворителя и определены параметры, описывающую эту зависимость. Показано, что соответствующая система определяющих соотношений дает более точное описание деформационных свойств сетчатых полимеров в широком диапазоне концентрации растворителя. Предложенная модель может быть использована при проектировании технических устройств и конструкций, основанных на применении полимерных гелей и эластомеров, предназначенных для эксплуатации в среде растворителей.

### Литература

- [1] Денисюк Е.Я. Механика и термодинамика высокоэластичных материалов, насыщенных жидкостью // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2010, № 1.– С. 118–138.
- [2] Денисюк Е.Я. Задачи механики полимерных гелей с односторонними ограничениями // Известия РАН. Механика твердого тела.– 2022, № 2.– С. 106–123
- [3] Денисюк Е.Я. Равновесие полимерных гелей в поле массовых сил // Известия РАН. Механика твердого тела.– 2022. № 4.– С. 3–24.

## БЕССЕТОЧНЫЙ МЕТОД ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДВУМЕРНЫХ ВЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ

Дмитрачкова А.П.<sup>1,2</sup>, Пантелеев С.А.<sup>1,2</sup>, Зарипов Д.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского КФУ, Казань,

<sup>2</sup>Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, Казань

[dmitra4ckova.alina@yandex.ru](mailto:dmitra4ckova.alina@yandex.ru)

Панорамные методы трассерной визуализации, такие как PIV (Particle Image Velocimetry) и PTV (Particle Tracking Velocimetry) [1] получили широкое распространение в современной экспериментальной механике жидкости и газа. Результатом их применения являются векторные поля скорости, определенные в общем случае в узлах неструктурированной расчетной сетки, тогда как для дальнейшего анализа полученных полей на практике удобно использовать данные, определённые на структурированной сетке. Это приводит к необходимости интерполяции или экстраполяции векторных полей скорости. Следует добавить, что также на практике с использованием полученных полей часто возникает необходимость расчета таких характеристик течения как завихренность скорости, градиент скорости и члены уравнения баланса кинетической энергии турбулентности, при расчете которых возникает необходимость вычисления первых и вторых пространственных производных скорости. Существует множество методов интерполяции и экстраполяции, а также вычисления производных, при этом отсутствует универсальный подход, позволяющий восстанавливать данные без снижения пространственного разрешения. В настоящей работе для этой цели предлагается использовать бессеточный метод [2], ранее успешно реализованный при деформации расчетных областей в методе GF-PIV [3] (GF – Grid Free).

Для оценки производительности предлагаемого метода с точки зрения снижения погрешности измерения и повышения пространственного разрешения рассматриваются двумерное и трёхмерное сдвиговые течения с меняющейся в пространстве длиной волны, моделирующие различные масштабы турбулентных вихревых структур. Анализируются систематическая и случайная погрешности скорости и ее первой и второй пространственных производных. Исследуется влияние управляющих параметров метода на его эффективность, а также изменение точности метода при наличии шума в исходных векторных полях скорости. В трёхмерном случае анализируется поле дивергенции скорости и проводится сравнительный анализ его точности. Проведено сравнение погрешности бессеточного метода с аналогичными данными, полученными с использованием других современных методов расчета.

### Литература

[1] Raffel M., Willert Ch.E., Scarano F., Kähler Ch.J., Wereley S.T., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry, 2018. 668 p.

[2] Tiwari S., Kuhnert J. Grid free method for solving the Poisson equation. Volume 25 of Berichte. Kaiserslautern: Fraunhofer Institut Techno- und Wirtschaftsmathematik, 2001.

[3] Зарипов Д.И., Токарев М.П., Лукьянов А.А., Маркович Д.М. Бессеточный планарный метод Particle Image Velocimetry. Вычислительные методы и программирование. 2022. 23, № 4. 328–338.

## ДИНАМИЧЕСКИЙ МАГНИТНЫЙ ОТКЛИК МОДЕЛИ МАГНИТНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ С УЧЕТОМ ВНУТРЕННЕЙ АНИЗОТРОПИИ ЧАСТИЦ

Добросердова А.Б.<sup>1</sup>, Канторович С.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург

<sup>2</sup>University of Vienna, Vienna, Austria

[alla.dobroserdova@urfu.ru](mailto:alla.dobroserdova@urfu.ru)

Магнитные эластомеры относятся к категории «умных» материалов, модуль упругости которых в значительной степени можно изменять при помощи внешнего магнитного поля [1–2]. Эластомеры получают путем диспергирования магнитных частиц размером от нескольких десятков нанометров до микрометров в упругом немагнитном носителе. Очевидно, что динамическое изменение магнитных и механических свойств эластомера, наряду с внешним полем, зависит также от таких параметров, как тип материала матрицы, распределение магнитных частиц, их размер, полидисперсность, их внутренние магнитные свойства. Именно такой широкий спектр управляющих параметров делает магнитные эластомеры одновременно очень перспективными для создания адаптивных демпфирующих устройств, виброгасителей или малоразмерных манипуляторов и сенсоров, искусственных мышц и матриц для выращивания биологических тканей, необходимых в регенеративной медицине и трансплантологии [3], но и весьма сложным объектом исследования.

В качестве первого этапа исследования выбрана наиболее простая модель магнитных эластомеров, в рамках которой рассматриваются магнитные частицы одного размера, обладающие внутренней анизотропией. Магнитные частицы взаимодействуют посредством магнитного диполь-дипольного потенциала, короткодействующее отталкивание описывается потенциалом «мягких сфер» (Викса-Чендлера-Андерсена). Упругая немагнитная матрица моделируется с помощью классического гармонического потенциала, который визуально может быть представлен в виде гармонических пружинок, удерживающих магнитные частицы, тем самым ограничивая их поступательные и вращательные движения.

Для простой модели магнитных эластомеров с учетом внутренней анизотропии частиц посредством компьютерного моделирования методом молекулярной динамики в программной среде ESPResSo [4] будет определен динамический магнитный отклик без учета внешнего магнитного поля. Это можно сделать с помощью флуктуационно-диссипационной теоремы, отражающей связь между автокорреляционной функцией от намагниченности и восприимчивостью внешнего магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 25-22-00270.

### Литература

- [1]. Filipcsei G. Magnetic Field-Responsive Smart Polymer Composites / G. Filipcsei // Oligomers – Polymer Composites – Molecular Imprinting / G. Filipcsei, I. Csetneki, A. Szilágyi, and M. Zrínyi. – Berlin, 2007. – PP. 137–189.
- [2]. Odenbach S. Microstructure and rheology of magnetic hybrid materials / S. Odenbach // Arch. Appl. Mech. – 2016. – Vol. 86. – PP. 269–279.
- [3]. Carlson J. D. MR fluid, foam and elastomer devices / J. D. Carlson J.D. and M. R. Jolly // Mechatronics. – 2000. – Vol. 10. – PP. 555–569.
- [4]. <https://espressomd.org/>

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АРМИРУЮЩЕГО ВОЛОКНА НА ПРОЦЕСС МНОГОМАСШТАБНОГО НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В 3D-ПЕЧАТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

Долгих Д.А., Ташкинов М.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[dolgikhdar@pstu.ru](mailto:dolgikhdar@pstu.ru), [m.tashkinov@pstu.ru](mailto:m.tashkinov@pstu.ru)

Применение технологий аддитивной печати совместно с подходами персонализированной биомедицины позволяют улучшить функциональные характеристики и свойства 3D-печатных полимерных протезов за счет внедрения армирующих элементов [1]. Оценка и возможность перераспределения напряжений, возникающих на внутренней поверхности гильзы, являются важными задачами при разработке протеза. Новый подход к армированию заключается в использовании структурированного прутка (препрега), состоящего из множества непрерывных углеродных волокон, объединенных полимерной матрицей [2]. Данный метод позволяет усиливать конструкции нетривиальной формы и может получить широкое распространение в других инженерных областях.

В данной работе представлены различные варианты укладки армирующих непрерывных волокон в аддитивно изготовленной полимерной гильзе для демонстрации возможности управления напряженным состоянием на внутренней поверхности протеза. Оценивается влияние на механическое поведение и процесс накопления повреждений в конструкции протеза основных параметров, таких как: толщина стенки гильзы, угол закручивания и диаметр прутка, расстояние между армирующими элементами. Подобрано оптимальное сочетание механических характеристик полимерных материалов, применяемых для аддитивных технологий. Исследована модель взаимодействия мягких тканей с гильзой протеза. Продемонстрировано, что контролируемое армирование углеродным прутком позволяет создавать зоны с низким напряженным состоянием, чтобы снимать давление с чувствительных участков культи. Ожидается, что полученные результаты позволят проектировать экзопротезные конструкции, сочетающие персонализированную архитектуру армирования, достигнутую благодаря возможностям 3D-печати, и улучшенные механические свойства благодаря использованию непрерывных волокон. Предполагается, что данные результаты будут полезны в области изготовления персонализированных изделий для протезирования.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10350).

### Литература

[1] Dolgikh, D. A. Pressure redistribution in additively manufactured composite prosthesis by architecture control / D. A. Dolgikh, M. A. Tashkinov, V. V. Silberschmidt // Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. – 2023.

[2] Introducing microarchitecture into 3D-printed prosthesis socket: Pressure distribution and mechanical performance / D. Dolgikh, M. Tashkinov, D. Sudoplatova, V. V. Silberschmidt // Medical Engineering and Physics. – 2023.

## ОПИСАНИЕ СУЛЬФИДНО-ОКСИДНОЙ КОРРОЗИИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛЬЮ ХЕМОМЕХАНИКИ

Дудин Д.С.<sup>1</sup>, Келлер И.Э.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
[dudin.d@icmm.ru](mailto:dudin.d@icmm.ru), [kie@icmm.ru](mailto:kie@icmm.ru)

Детали газотурбинных двигателей испытывают высокие температурные и механические нагрузки в условиях агрессивной окружающей среды продуктов сгорания топлива и кислорода [1]. Процессы окисления, сульфидно-оксидной и хлоридной коррозии вызывают деградацию поверхности материала: образование химических соединений с агрессивными веществами, микротрещин и пор, вымывание легирующих элементов в тонком слое под коррозионной плёнкой [2] – что приводит к образованию макротрещин с последующим разрушением. Понимание кинетики и механики коррозионных процессов требует верифицированных связанных моделей, учитывающих взаимную диффузию компонентов и химические реакции между ними, конечные деформации материала и напряжённое состояние, изменение микроструктуры.

Проанализированы работы по сульфидно-оксидной коррозии хромированной жаропрочной стали при температуре 800 °С, на основе которых предложен наиболее простой механизм, включающий протекание химических реакций, разрешённых термодинамикой: окисление железа и хрома, сульфидирование хрома. На первом этапе молекулярный кислород проникает в металл и реагирует с ионами железа и хрома, движущимися навстречу кислороду. После достижения критической толщины коррозионного слоя молекулярная сера проникает в повреждённый поверхностный слой и доходит до границы металл-оксид, где начинает реагировать с хромом и проникать вглубь металла, стимулируя взаимную диффузию и развитие сульфидного слоя. Продолжающееся наращивание оксидных слоёв вместе с окислением сульфида хрома освобождает серу для дальнейшего проникновения вглубь металла, из-за чего присутствие серы в оксидных слоях не наблюдается.

Изложенный механизм использован при формулировке модели связанных процессов взаимной диффузии и химических реакций в среде с конечными вязкоупругопластическими деформациями. Разработан комбинированный подход к разложению диффузионного и деформационного движения [3], который сочетает маркерную диффузионную систему отсчёта [4] и материальную конвективную скорость при описании связанных процессов механо-диффузии и обладает определенными преимуществами перед классическим подходом. Модель описывает формирование слоистой структуры поверхности и истощение легирующими элементами подслоя материала, что наблюдается в эксперименте.

*Исследование выполнено за счет крупного научного проекта Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).*

### Литература

- [1] Пивоварова М. В., Гладкий И. Л., Ресурс деталей газотурбинных двигателей в условиях воздействия коррозионных сред // Вестник Самарского университета. – 2019. – т. 18, № 3. – с. 109-117.
- [2] Ning Z., Zhou Q., Liu Z. et al., Effect of imposed stresses on high temperature corrosion behavior of T91 // Corrosion Science. – 2021. – т. 189. – с. 109595.
- [3] Дудин Д. С., Келлер И. Э., Обзор подходов к формулировке связанных уравнений взаимной диффузии в вязкоупругом теле // Химическая физика и мезоскопия. – 2022. – т. 24, № 3. – с. 296-311.
- [4] Brassart L., Liu Q., Suo Z., Mixing by shear, dilation, swap, and diffusion // J. Mech. Phys. Solids. – 2016. – т. 96. – с. 48-64.

## УСТОЙЧИВОСТЬ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЕЙ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ, ОСРЕДНЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ И МАССОПЕРЕНОС ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ

Дьякова В.В.<sup>1,2</sup>, Власова О.А.<sup>1</sup>, Козлов В.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный гуманитарно - педагогический университет, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

[dyakova@pspu.ru](mailto:dyakova@pspu.ru), [vlasova\\_oa@pspu.ru](mailto:vlasova_oa@pspu.ru), [kozlov@pspu.ru](mailto:kozlov@pspu.ru)

Экспериментально изучается динамика осциллирующей границы раздела двух маловязких несмешивающихся жидкостей различной плотности в плоском вертикальном щелевом канале. Исследования проводятся в широком диапазоне амплитуд и частот колебаний для пар жидкостей с различными коэффициентами межфазного натяжения в каналах различной толщины. Эксперименты проводятся в щелевом канале, соединенном с гидравлическим контуром, обеспечивающим гармоническое колебательное движение жидкостей с нулевым средним расходом [1]. Обнаружено пороговое возбуждение параметрических колебаний межфазной границы в виде стоячей волны, частота колебаний которой кратна частоте поршневых колебаний жидкости в канале. В зависимости от величины межфазного натяжения и параметров осцилляций были обнаружены колебания границы раздела с частотой равной частоте поршневых колебаний жидкостей (синхронная мода) и с частотой вдвое большей частоты поршневых колебаний (субгармоническая мода). Выявлено, что определяющую роль в формировании стоячей волны играет межфазное натяжение жидкостей. Так, в экспериментах с парами жидкостей с большим коэффициентом межфазного натяжения наблюдается возникновение только синхронной моды. При этом порог развития неустойчивости определяется исключительно амплитудой поршневых колебаний жидкости, при которой происходит срыв контактной линии и переход от менисковых колебаний межфазной границы к поршневым. В экспериментах с парой жидкостей с малым коэффициентом межфазного натяжения наблюдается развитие субгармонической моды, за потерю устойчивости в этом случае отвечает осцилляционное ускорение. При умеренных значениях коэффициента межфазного натяжения при малых амплитудах поршневых колебаний жидкости возбуждается синхронная мода; при повышении амплитуды поршневых колебаний жидкости на фоне синхронной моды развивается субгармоническая мода с большей длиной волны.

Обнаружено, что субгармонические колебания границы генерируют осредненные вихревые течения по обе стороны от осциллирующей межфазной границы в виде системы согласованно вращающихся вихрей, оси вращения которых ориентированы перпендикулярно плоскости канала. Исследование динамики межфазной поверхности и вихревых осредненных течений при осцилляционном движении жидкостей актуально в плане разработки осцилляционных методов интенсификации массопереноса через межфазную поверхность. Выполнено экспериментальное исследование темпа молекулярного массопереноса растворимой примеси через осциллирующую межфазную границу раздела несмешивающихся жидкостей в зависимости от параметров осцилляций. Обнаружено, что параметрические колебания границы раздела способны интенсифицировать темп массопереноса примеси через межфазную поверхность несмешивающихся жидкостей.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 23-11-00242).

### Литература

[1] Kozlov V., Vlasova O., Dyakova V., Oscillatory excitation of Faraday waves on the interface of immiscible fluids in a slotted channel //Physics of Fluids. – 2024. – V. 36. – №. 10.



## КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРИ НЕОДНОРОДНОСТИ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТА

Егорова А.А.<sup>1,2</sup>, Самойлова А.Е.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный университет, Пермь

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
[anssomeoil@gmail.com](mailto:anssomeoil@gmail.com)

В настоящей работе исследуется конвективный перенос в донных отложениях, вызванный неоднородностью геотермического градиента. Исследование таких систем вызывает интерес из-за проблем, связанных с формированием природных депозитов гидрата метана, и с потенциальной возможностью захоронения промышленных выбросов углекислого газа [1]. Сложность моделирования донных отложений заключается в наличии некоторых принципиально неизмеримых параметров, которые фактически являются «подгоночными» под данные натуральных наблюдений [2]. Одним из таких параметров выступает скорость восходящего фильтрационного потока, которая имеет характерные значения 0,1-0,5 м/тыс. лет, и которая, очевидно, не поддаётся измерению. В основе нашего исследования лежит гипотеза о том, что данный восходящий фильтрационный поток имеет конвективную природу. Ранее авторами были получены пороги возникновения свободной тепловой конвекции в донных отложениях, вызванной подогревом снизу из-за геотермического градиента. Однако для реальных геологических систем проницаемость породы низкая, так что система находится в подпороговой области. При этом реальные системы существенно неоднородны, поэтому мы полагаем, что конвективная неустойчивость может быть вызвана крупномасштабной неоднородностью геотермического градиента.

В рамках уравнений Дарси-Буссинеска, описывающих конвекцию в пористой среде, проводится длинноволновое разложение. В предположении малости неоднородности геотермического градиента аналитически получены выражения для скорости фильтрационного потока, определяемые этой неоднородностью. Используются доступные данные натуральных измерений геотермического теплопотока для нескольких мест на планете, представляющих интерес с точки зрения добычи газовых гидратов [4]. Вычислены количественные характеристики фильтрационного потока в донных отложениях в эти местах, имеющего конвективную природу и связанного с неоднородностью геотермического градиента.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 124021600038-9.

### Литература

- [1] Голдобин Д.С., Барях А.А. Подземная утилизация углерода как элемент декарбонизации деятельности человека // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. — 2023. — № 4. — С. 6—13.
- [2] Davie M. K., Buffett B. A. A numerical model for the formation of gas hydrate below the seafloor // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2001. — V. 106. — №. B1. — P. 497—514.
- [3] Самойлова А.Е., Егорова А.А. Тепловая конвекция в слое пористой среды между водным телом и непроницаемым массивом // Пермские гидродинамические научные чтения: материалы IX Всероссийской конференции. — Пермь, 2023. — С. 367—370.
- [4] Paull C. K., Matsumoto R., Wallace P. J. and Dillon W. P. Proceedings, scientific results, Ocean Drilling Program, Leg 164, gas hydrate sampling on the Blake Ridge and Carolina Rise // Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results. — 2000. — Vol. 164. — P. 1-459.

## **ВЛИЯНИЕ ТИПА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА НА МЕХАНИЧЕСКИЙ ОТКЛИК СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Еленская Н.В., Ташкинов М.А., Виндокуров И.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[n.elenskaya@pstu.ru](mailto:n.elenskaya@pstu.ru), [m.tashkinov@pstu.ru](mailto:m.tashkinov@pstu.ru), [ivv@pstu.ru](mailto:ivv@pstu.ru)

Операции по восстановлению целостности костной ткани занимают второе место по распространенности среди процедур эндопротезирования. Высокий спрос обосновывается различными травмами, лечением онкологических заболеваний и тяжелым остеоартрозом суставов [1]. В тканевой инженерии используются скаффолды — решетчатые структуры, которые обеспечивают структурную поддержку поврежденного участка кости и способствуют образованию живой ткани. Для успешного клинического применения скаффолды должны обладать физико-механическими свойствами, аналогичными свойствам костной ткани, а их структура должна быть схожа с архитектурой замещаемого фрагмента. Один из подходов к проектированию таких структур предполагает использование ячеек, основанных на трижды периодических минимальных поверхностях (ТПМП) [2]. Поскольку архитектура костной ткани неоднородна, структуры моделируются с применением функционального градиента для достижения свойств, близких к оригинальным [3]. Важно исследовать, как функциональный градиент и его направление влияют на свойства конечной конструкции.

В данной работе рассматриваются структуры на основе ТПМП с различными типами и направлениями градиента. Оценивается влияние градиента на механические характеристики и на морфометрические свойства этих структур. Морфометрический анализ выявил заметное влияние типа функционального градиента на архитектурные характеристики структур, в то время как направление градиента не оказало значительного влияния на эти характеристики. Механический анализ функциональных градиентных структур показал, что жесткость увеличивается при ориентации градиента перпендикулярно к сжимающей нагрузке. Такие структуры демонстрируют меньшую пластическую деформацию благодаря перераспределению напряжений внутри них, что также снижает общее напряженное состояние конструкции. Анализ распределения напряжений по объему структуры позволил выявить влияние размера переходной зоны между геометриями, а также выбранного типа элементарной ячейки на концентрацию напряжений в переходной зоне, а также на характер распределения. Полученные данные могут быть полезны исследователям лабораториям и медицинским организациям, занимающимся проблемами замещения костной ткани.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2024-0013).

### Литература

- [1] Development of Bioactive Scaffolds for Orthopedic Applications by Designing Additively Manufactured Titanium Porous Structures: A Critical Review / M. V. Kiselevskiy, N. Y. Anisimova, A. V. Kapustin [et al.] // *Biomimetics*. – 2023. – Vol. 8. – № 7. – P. 546.
- [2] Understanding of trabecular-cortical transition zone: Numerical and experimental assessment of multi-morphology scaffolds / N. Elenskaya, M. Tashkinov, I. Vindokurov [et al.] // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2023. – Vol. 147. – № August. – P. 106146.
- [3] Еленская, Н. В. Численное поведение деформационного поведения полимерных решетчатых структур с градиентом пористости, изготовленных на основе аддитивных технологий / Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов, В. В. Зильбершмидт // *Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия*. – 2022. – Vol. 9 (67). – № 4. – P. 679-692.

## СТАТИЧЕСКОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ ОБЕЗДВИЖЕННЫХ МНОГОГРАНУЛЬНЫХ ЧАСТИЦ И ИХ АНСАМБЛЕЙ

Елфимова Е.А.<sup>1</sup>, Грохотова Е.В.<sup>1</sup>, Соловьева А.Ю.<sup>1</sup>, Иванов А.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург

[Ekaterina.Elfimova@urfu.ru](mailto:Ekaterina.Elfimova@urfu.ru)

В работе исследуется намагничивание во внешнем статическом магнитном поле обездвиженных многогранульных частиц (МГЧ), содержащих малое количество суперпарамагнитных гранул. Разработана теория для определения намагниченности индивидуальной МГЧ с обездвиженными гранулами, магнитный момент в которых свободно вращается внутри тела гранулы. Теория может быть применена для прогнозирования намагниченности МГЧ любой структуры; кроме того, она учитывает межгранульные дипольные взаимодействия на уровне парных корреляций. Построенная теория протестирована на результатах компьютерного Монте-Карло (МК) моделирования для серий образцов МГЧ, содержащих 4 и 7 гранул, расположенных в правильной структуре и произвольным образом. Теория хорошо согласуется с данными компьютерного моделирования для МГЧ с интенсивностью межгранульных дипольных взаимодействий  $\lambda \leq 2$ .

Установлено, что намагничивание МГЧ затрудняется с ростом межгранульных дипольных взаимодействий. Это связано с тем, что диполь-дипольные взаимодействия способствуют формированию ориентационной текстуры магнитных моментов, которая препятствует их выстраиванию по направлению поля. Ориентационное текстурирование магнитных моментов в МГЧ наблюдается и в отсутствии магнитного поля, однако за счет постоянных флуктуаций магнитных моментов намагниченность МГЧ в нулевом поле равна нулю. Увеличение напряженности магнитного поля приводит к монотонному увеличению намагниченности МГЧ, при этом среднее значение намагниченности МГЧ с различной внутренней структурой не превосходит одночастичной намагниченности Ланжевена. Тем не менее, внутренняя структура МГЧ оказывает влияние на их магнитный отклик, и разброс намагниченности МГЧ от среднего значения увеличивается по мере роста интенсивности дипольного межгранульного взаимодействия и числа гранул в МГЧ.

Предложен метод определения намагниченности ансамбля невзаимодействующих обездвиженных МГЧ со взаимодействующими гранулами путем отождествления этой системы с ансамблем обездвиженных одиночных невзаимодействующих суперпарамагнитных частиц, для которых определяется эффективный параметр магнитной анизотропии, зависящий от интенсивности межгранульных взаимодействий в МГЧ.

Полученные в этой статье аналитические выражения для намагниченности индивидуальных МГЧ и их ансамблей позволяют прогнозировать магнитный отклик МГЧ в вязких биологических средах, например, в биологических клетках, что является теоретической основой для совершенствования технологий медицинской диагностики и клеточной терапии, использующих МГЧ в качестве магнитоактивных агентов для визуализации клеток.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 23-12-00039.

## ФОРМА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ

Ельтищев В.А.<sup>1</sup>, Лосев Г.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН*  
[eltishchev.v@icmm.ru](mailto:eltishchev.v@icmm.ru), [losev.g@icmm.ru](mailto:losev.g@icmm.ru)

Вращающиеся течения сплошных сред встречаются не только в атмосфере и океанах, но и во многих прикладных технологических устройствах, например в различных центрифугах, орбитальных шейкерах и перемешивателях [1].

В настоящей работе рассматривается проблема искривления свободной поверхности жидкого металла в цилиндрической полости под действием крупномасштабного вихревого течения во внешнем магнитном поле. Растекание тока происходит от центрального электрода, расположенного в нижней части цилиндрического сосуда, к боковому электроду, представляющему собой боковую поверхность цилиндра. Взаимодействие внешнего постоянного вертикального магнитного поля с протекающим в жидкой электропроводной среде током порождает азимутальную компоненту электромагнитной силы, которая инициирует интенсивное вращение жидкого металла [2]. Результирующий инерционный эффект приводит к образованию воронки на свободной поверхности жидкости.

Форма воронки исследуется экспериментально, аналитически и с использованием численных методов. Получены аналитические и численные решения, описывающие форму свободной поверхности жидкого металла в режимах вращения различной интенсивности. Экспериментально измерена форма воронки при разных величинах управляющих параметров задачи (интенсивность силового электромагнитного воздействия, размер центрального токоподвода). Сравнение данных измерений с результатами математической модели позволяет оценить границы применимости последней.

### Литература

- [1] Кирко И.М., Самойлович Ю.А., Долгих В.М., Хрипченко С.Ю., Ясницкий Л.Н. Электровихревой способ перемешивания расплава затвердевающих слитков // Магнитная гидродинамика. – 1985. – т. 21, № 3. – с. 100-118.
- [2] Eltishchev V., Losev G., Kolesnichenko I. Oscillations of free surface of rotating liquid metal in a cylindrical cell // Magnetohydrodynamics. – 2021. – vol. 57, no. 1. – P. 41-50.

## МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ НА ПОДРАБОТАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Епин В.В., Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Шардаков И.Н.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[epin.v@icmm.ru](mailto:epin.v@icmm.ru), [gusev.g@icmm.ru](mailto:gusev.g@icmm.ru), [flower@icmm.ru](mailto:flower@icmm.ru), [shardakov@icmm.ru](mailto:shardakov@icmm.ru)

Эксплуатируемые на подрабатываемых территориях строительные сооружения подвержены негативному влиянию от деформационных процессов, вызванных добычей полезных ископаемых скрытыми способами. Выемка обогащенных полезными ископаемыми пластов из недр приводит к перераспределению напряженно-деформируемого состояния всего породного массива, расположенных выше. Далее в приповерхностном слое грунта, и на поверхности земли развиваются негативные деформационные процессы, которые разрушают расположенные в данной зоне здания [1]. Развитие такого рода деформационных процессов в породном массиве продолжается десятилетия и усугубляется из-за нештатных ситуаций, таких как затопление рудников [2], которые могут привести к ускорению процессов оседания грунта или образованию разломов. Ряд подобных событий произошел на Верхнекамском месторождении калийных солей. В результате аварийного затопления одного из рудников произошло растворение несущих пластов соляных пород, что привело к катастрофическому усилению деформационных процессов в вышерасположенных слоях грунтового массива. В зоне оседания оказалась часть городских кварталов г. Березники с жилыми домами и объектами социальной и инженерной инфраструктуры. В данном исследовании приведены результаты работ по деформационному мониторингу 39 зданий и сооружений городской инфраструктуры, которая подверглась техногенному влиянию от процессов связанных с добычей полезных ископаемых. Освещены методы и способы контроля и прогнозирования деформированного состояния различных строительных сооружений. Показаны результаты непрерывных наблюдений за период больше, чем 12 лет. Контроль деформированного состояния зданий, находящихся в опасной зоне, организован с помощью систем автоматизированного деформационного мониторинга, основанных на методе гидростатического нивелирования [3]. Площадь покрытия территории города такими системами составила порядка 10 квадратных километров. В результате наблюдений начиная с 2013 г. получены эволюции неравномерных оседаний зданий, которые позволяют определить как характер деформационных процессов, так и их скорость. Произведены оценки максимальной относительной разности осадок и изменения среднего наклона для зданий. Установлено, что неравномерные оседания большинства зданий происходят практически непрерывно и со скоростью, близкой к постоянной, кроме группы зданий, расположенных в непосредственной близости от очагов оседаний – провалов грунта. Для этой группы наблюдается увеличение скорости развития деформаций.

### Литература

- [1] Нестерова В. Ю., Барсуков И.В., Стрюков Ю. Н. Оценка влияния подземных горных работ на состояние зданий и сооружений на земной поверхности на угольных месторождениях // Уголь . – 2014. – № 10(1063). – С. 29–34.
- [2] Samsonov S., Baryakh A. Estimation of Deformation Intensity above a Flooded Potash Mine Near Berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR Interferometry // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12(19).– 3215.
- [3] Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В. Результаты многолетних наблюдений неравномерных осадок зданий, находящихся на территории Верхнекамского калийного месторождения в г. Березники // Известия Уральского государственного горного университета. – 2022. – № 3(67). – С. 80-89.

## **НЕЛИНЕЙНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ ВОЛНА, РАСПРОСТРАНЯЮЩАЯСЯ В СТЕРЖНЕ, ДЕФОРМИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА КОТОРОГО ОПИСЫВАЕТСЯ НЕОГУКОВСКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ**

Ерофеев В.И.<sup>1,2</sup>, Бутыгин Д.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова  
Российской академии наук, Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
[erof.vi@yandex.ru](mailto:erof.vi@yandex.ru), [danilbutygin3@gmail.com](mailto:danilbutygin3@gmail.com)*

Из вариационного принципа Гамильтона-Остроградского получено уравнение динамики стержня, деформирование материала которого описывается неогуксовским потенциалом [1, 2]. При формулировке модели предполагалось, что выполняются гипотезы плоских сечений и одноосного деформированного состояния, кроме кинетической энергии продольного перемещения частиц стержня и потенциальной энергии растяжения-сжатия учитывались кинетическая энергия поперечного движения и потенциальная энергия сдвиговых деформаций. Полученное уравнение представляет собой обобщение модели Бишопа [3], оно наглядно демонстрирует, что в стержне происходят два связанных между собой динамических процесса: продольные движения частиц стержня и поперечные движения («толщинные колебания»). Получено дисперсионное соотношение для линейного случая монохроматической волны, а также качественные характеристики процесса такие как модули фазовой и групповой скоростей. Для нелинейного случая исследованы: генерация квазигармонической волны удвоенной частоты; формирование пространственно-локализованных волн (солитонов) деформации. Исследованы также различные сценарии попутного и встречного взаимодействия солитонов. При этом особое внимание уделено процессу расщепления уединенных волн, при котором каждый из взаимодействующих солитонов распадается на несколько солитонов и квазигармонических волновых пакетов.

### Литература

- [1] Черных К.Ф. Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчетах – Л.: Машиностроение, 1993. – 336 с.  
[2] Жидков А.В., Леонтьев Н.В. Моделирование поведения гиперупругих материалов: учебно-методическое пособие – Нижний Новгород: ННГУ, 2019. – 56 с.  
[3] Ерофеев В.И., Кажав В.В., Семерикова Н.П. Волны в стержнях: Дисперсия. Диссипация. Нелинейность – М.: Физматлит, 2002. – 208 с.

## **N-СТУПЕНЧАТЫЙ ПЕРЕХОД МЕЖДУ ДВУМЯ ОДНОМЕРНЫМИ КРИСТАЛЛАМИ**

Ершов А.Д.<sup>1</sup>, Кузькин В.А.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

[totamonik@gmail.com](mailto:totamonik@gmail.com)

В работе рассматривается процесс перехода волнового пакета через ступенчатый интерфейс между двумя одномерными гармоническими кристаллами на подложке.

Важнейшими характеристиками для измерения эффективности перехода являются коэффициенты прохождения  $T$  и отражения  $R$ . По определению данные коэффициенты показывают отношение энергий отраженной и прошедшей волн к энергии падающей волны. В работе [1] поиск коэффициентов был решен для системы с одним переходом. В настоящей работе рассмотрен более сложный случай: последовательность из переходов, в предположении, что переходы достаточно велики по сравнению с длиной волны. В такой постановке получено выражение для системы из  $N$  переходов, зависящее исключительно от коэффициентов прохождения и отражения на каждом из интерфейсов.

Исследованы частные случаи, где  $T_i \ll 1$  и  $R_i \ll 1$ . Для этих случаев получены упрощенные формулы для вычисления эффективных коэффициентов.

Проведено сравнение с одноступенчатым интерфейсом, рассмотренном в [1]. Показано, что добавление дополнительной ступени может привести к увеличению, так и к уменьшению и сохранению пропускной способности в зависимости от значений групповых скоростей в системе.

Показано, что максимальное значение коэффициента прохождения всего интерфейса достигается при равенстве коэффициентов прохождения для каждого перехода.

Все полученные результаты были также верифицированы численными расчетами.

### Литература

[1] Vitaly A. Kuzkin. Acoustic transparency of the chain-chain interface. – Phys. Rev. E 107, 065004 – Published 28 June, 2023

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МАГНИТНЫХ КОЛЛОИДОВ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Еськова И.В.<sup>1</sup>, Ерин К.В.<sup>1</sup>

Физико-технический факультет Северо-Кавказского федерального университета, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина 1, Россия.

[i.tatova@inbox.ru](mailto:i.tatova@inbox.ru), [exiton@inbox.ru](mailto:exiton@inbox.ru)

В магнитных жидкостях при воздействии электрического поля происходят сложные электрофизические процессы: агрегация частиц, формирование объёмного заряда, возникновение электрогидродинамических течений и др. Одним из ключевых параметров, влияющих на электрофизические процессы в магнитных коллоидах, является электрическая проводимость. Традиционно, измерение высоковольтной электропроводности осуществляется методом амперметра и вольтметра при помощи построения вольт-амперной характеристики. Однако измерение ВАХ на постоянном токе затруднено за счет влияния приэлектродного объёмного заряда и электрохимических процессов на поверхности электрода, которые существенно меняют величину тока.

Мы предлагаем новый метод измерения проводимости магнитной жидкости на основе жидких диэлектриков, путем измерения характерных времен максвелл-вагнеровской релаксации в ячейке электродом, покрытым твердой изолирующей пленкой. Наличие полипропиленовой пленки толщиной от 40-250 мкм хотя бы на одном из электродов, позволяло исключить свободный обмен зарядами, который мешает добиться компенсации внешнего поля внутренним полем неравномерно распределенного объёмного заряда. Для определения времени релаксации электрического поля использовался электрооптический эффект двойного лучепреломления в поле прямоугольных импульсов длительностью несколько секунд.

На рисунке 1 показана характерная форма электрооптического сигнала в магнитной жидкости на основе керосина с концентрацией 0,01% при воздействии прямоугольных импульсов высокого напряжения (9 кВ) длительностью 5 с. Характерный спад сигнала после включения и выключения поля имеет экспоненциальную форму с характерным временем, определяемым толщиной, диэлектрической проницаемостью слоев и проводимостью коллоида. Проведение таких экспериментов для изолирующих плёнок различной толщины позволяет вычислить удельную проводимость магнитного коллоида. Для этого нужно определить тангенс угла наклона зависимости времени релаксации от отношения толщин диэлектрической пленки на поверхности электрода  $d_1$  и магнитного коллоида  $d_2$  (рисунок 2). Определенная таким образом низкочастотная электрическая проводимость находится в хорошем согласии с данными измерений ВАХ.

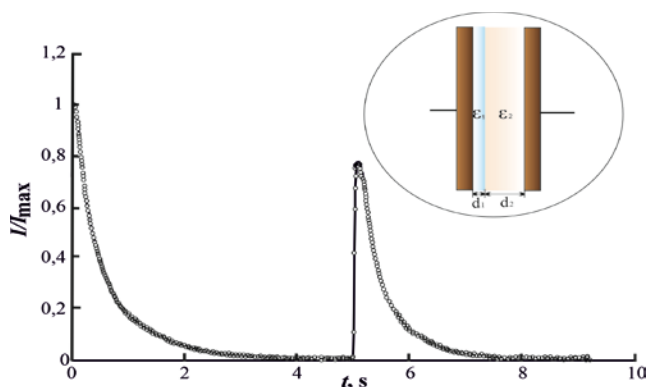


Рисунок 1.

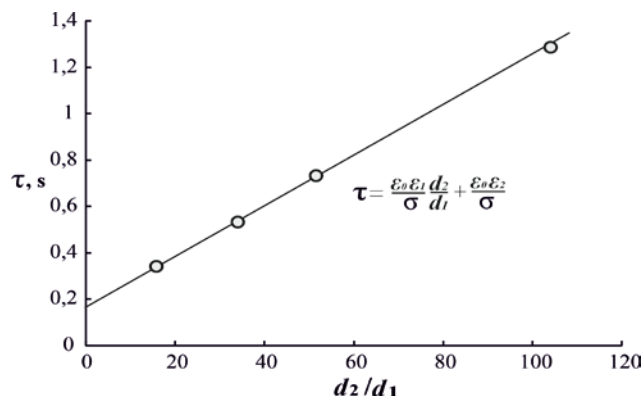


Рисунок 2.



## ГИДРО- И СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КАК СПОСОБ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОВЗРЫВНОГО РАСПЫЛЕНИЯ ТОПЛИВА

Ефремов Д.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[efremov.d@icmm.ru](mailto:efremov.d@icmm.ru)

В работе экспериментально исследованы явления гидро- и сонолюминесценции при течении гидравлического масла в узком канале с применением оригинальной экспериментальной установки [1]. Установлено пороговое значение скорости деформации  $\dot{\epsilon} \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$  ( $Re \sim 1350$ ,  $\nabla P \sim 1,2 \text{ ГПа/м}$ ) при котором наблюдается резкое увеличение интенсивности сигналов гидро- и сонолюминесценции. Разработанные конструкции измерительных ячеек позволили разделить сигналы, характерные для проявлений гидро- и сонолюминесценции. Статистическая обработка сигналов, полученных с фотоумножителя, позволила установить различия законов распределения импульсов гидро- и сонолюминесценции, что подтверждает качественные отличия исследуемых явлений. Гидролюминесценция вызвана реализацией псевдопластического механизма переноса импульса в жидкостях, сонолюминесценция связывается с механизмами кавитации [2].

Полученные экспериментальные результаты имеют практическое приложение при исследовании вторичного распыления топлив. Взрывное распыление капель усиливает локальное перемешивание топлива с воздухом в зоне сгорания, что приводит к более полному и эффективному сжиганию. При прохождении топлива в узком канале форсунки со скоростью деформации  $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ с}^{-1}$ , в нём реализуется псевдопластический механизм переноса импульса, проявлением которого является гидролюминесценция. При выходе топлива из форсунки в камеру сгорания, вследствие падения давления интенсивно образуются кавитационные пузырьки (микровзрывы) за счёт сдвиговых разрывов в жидкости (центров гидролюминесценции), проявлением которых является сонолюминесценция.

Исследование вторичного распыления топлив будет осуществляться на двухконтурной экспериментальной установке по регистрации явлений гидро- и сонолюминесценции в широкой номенклатуре технических жидкостей, в том числе агрессивных к деталям гидравлического насоса [3].

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы 124020200116-1.

### Литература

- [1] Ефремов Д.В. Уваров С.В., Дежкунов Н.В., Наймарк О.Б. Исследование стадийности развития кавитации в каналах по данным измерений гидро- и сонолюминесценции // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2024. – т. 90, № 6. – с. 36. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-6-36-41>
- [2] Naimark O.B. Uvarov S.V., Bannikova I.A., Efremov D.V., Bayandin Yu.V., Dezhkunov N.V. Localized shear as a quasi-plastic mechanism of momentum transfer in liquids // Letters on Materials. – 2023. –Vol. 13, No 2. – P. 93-97. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-2-93-97
- [3] Патент № 2796207 С1 РФ. Способ исследования кавитационных явлений в технологических жидкостях и стенд для его осуществления / Д.В. Ефремов, С.В. Уваров, И.А. Банникова, О.Б. Наймарк

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРОНИЦАЕМОСТИ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ПРИ ТРЕХОСНОМ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

Зайцев А.В.<sup>1</sup>, Заболотных А.А.<sup>1</sup>, Карев В.И.<sup>2</sup>, Коваленко Ю.Ф.<sup>2</sup>,  
Химуля В.В.<sup>2</sup>, Шевцов Н.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

<sup>2</sup>Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва

[a-zaitsev@mail.ru](mailto:a-zaitsev@mail.ru)

Проведена обработка результатов испытаний кубических образцов высоко- и низкопористых нефтенасыщенных известняков, слагающих продуктивные пласты месторождения Пермского края, полученные из экспериментов, проведенных на Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) ИПМех РАН. ИСТНН обеспечивает равномерное приложение нагрузок (задание перемещений точек поверхности) по всей площади поверхности образца в течение всего процесса деформирования, включая стадию разрушения [1–5]. Измерение проницаемости осуществлялось непрерывно во время проведения эксперимента.

Разработана программа трехосного непропорционального нагружения. На всех этапах активного нагружения и разгрузки образец предельно «жестко» изотропно обжимался. Затем достигнутое давление по двум осям поддерживалось постоянным (предельно «мягкое» нагружение), а по третьей оси было реализовано вновь предельно «жесткое» активное сжатие. Программа исключала неконтролируемое макроразрушение во всех циклах предельно «жесткого» обжатия. Это позволило определить четыре независимые упругие модуля (две пары модулей нормальной упругости и коэффициентов Пуассона) высоко- и низкопористых нефтенасыщенных известняков на каждом цикле нагружения, характеризующимся различными боковыми давлениями. Обнаружены признаки деформационной анизотропии. Показано, что условие положительности собственных значений оператора упругости, а также использование модуля Юнга в плоскости напластования в качестве четвертной независимой деформационной характеристики, определяемой для фиктивного изотропного тела, является «жесткими» и чувствительными к изменению типа упругой симметрии ограничениями. Проведена оценка влияния предварительной экстракции жидких углеводородов на деформационные свойства карбонатных пород. Показано существенное влияние жидкой фазы на значения модулей нормальной упругости, и коэффициентов Пуассона для различных давлений обжатия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 25–21–00442).

### Литература

- [1] Пантелеев И.А., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Зайцев А.В., Карев В.И., Устинов К.Б., Шевцов Н.И. Эволюция поврежденности при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника по данным акустической эмиссии // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 56–63.
- [2] Шевцов Н.И., Зайцев А.В., Пантелеев И.А., Исследование связи напряженно-деформированного состояния горных пород с потоком акустической эмиссии на испытательной системе трехосного независимого нагружения // Процессы в геосредах. – 2019. – № 1(19). – С. 129–136.
- [3] Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Зайцев А.В., Шевцов Н.И., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Эффект Кайзера при трехосном сжатии песчаника с последовательным вращением эллипсоида заданных напряжений // ФТПРПИ. – 2020. – № 3. – С. 47–55.
- [4] Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Зайцев А.В., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б., Шевцов Н.И. Эффект Кайзера при многоосном непропорциональном сжатии песчаника // Доклады РАН. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 495. – № 1. – С. 63–67.
- [5] Пантелеев И.А., Зайцев А.В., Устинов К.Б., Мубассарова В.А., Шевцов Н.И., Химуля В.В., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Ориентационная природа эффекта деформационной памяти при трехосном циклическом неравнокомпонентном сжатии песчаника // Вестник Самарского гос. технического ун-та. Физико-математические науки. – 2022. Т. 26, № 2. – С. 293–310.

## ЭФФЕКТИВНЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ОСТЕОНА И КОМПАКТНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ ЧЕЛОВЕКА

Зайцев А. В., Мельников Д. Л.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

[a-zaitsev@mail.ru](mailto:a-zaitsev@mail.ru), [demidmeln@mail.ru](mailto:demidmeln@mail.ru)

Для разработки новых методов предупреждения и лечения повреждений костной ткани необходимо спрогнозировать изменение деформационных свойств остеона и компактной костной ткани. Используя полидисперсную модель однонаправленно-армированного композита З. Хашина [1] и многомасштабный подход, были определены эффективные упругие модули остеона и компактной костной ткани с учётом биологического возраста человека.

Рост ламелей остеона происходит за счёт наращивания коллагеновых волокон. Это наращивание может происходить как вдоль оси кости, так и в поперечном направлении. В результате образуется поперечная и/или продольная коллагеновая текстура, определяющая ориентацию плоскости изотропии остеона.

Была сформулирована гипотеза о том, что направление роста коллагеновых волокон компактной костной ткани зависит от возраста человека. У молодого (несформированный скелет), имеет место как поверхностный рост с увеличением поперечного сечения всей кости, так и продольный рост. В результате этого происходит наслаивание участков волокон друг на друга с образованием поперечной структуры. У взрослого человека с течением времени происходит отмирание живой костной ткани и образование радиальной структуры.

Компактная костная ткань имеет два масштабных уровня: «масштабный уровень 1» – трансверсально-изотропный составной цилиндр с эффективным модулем Юнга  $E_{33}^{*(1)}$ , коэффициентом Пуассона  $\nu_{13}^{*(1)}$  и коэффициентом объёмного сжатия при плоской деформации  $K_{23}^{*(1)}$ ; «масштабный уровень 2» – представительный объём трансверсально-изотропной среды с цилиндрическими включениями с эффективными свойствами  $E_{33}^{*(2)}$ ,  $\nu_{13}^{*(2)}$  и  $K_{23}^{*(2)}$ . Часть свойств на масштабном уровне 2 являются спрогнозированными эффективными величинами предыдущего уровня 1, а «недостающие» упругие модули – экспериментальные данные.

В таблице представлены спрогнозированные значения эффективных модулей в зависимости от ориентации плоскостей изотропии (учитывает биологический возраст человека). Для масштабного уровня 1 объёмная доля гаверсова канала  $\nu_H$  является отношением его диаметра (20–100  $\mu\text{m}$ ) к диаметру всего остеона (150–350  $\mu\text{m}$ ), а для масштабного уровня 2 объёмная доля остеона  $\nu_O$  (изменяется в пределах от 10 до 70 %) определяется отношением площадей, занимаемых остеонами и интерстициальной ламели (отмершая ткань).

**Таблица.** Влияние ориентации плоскостей изотропии на эффективные модули остеона и компактной костной ткани человека

$\nu_H$	$E_{33}^{*(1)}$ , ГПа	$\nu_{13}^{*(1)}$	$K_{23}^{*(1)}$ , ГПа	$\nu_O$	$E_{33}^{*(2)}$ , ГПа	$\nu_{13}^{*(2)}$	$K_{23}^{*(2)}$ , ГПа
0,0177	17,4 / 18,16	0,39 / 0,36	11,48 / 20,96	0,1	19,05 / 20,22	0,4 / 0,3	12,46 / 22,36
0,0576	16,7 / 17,49	0,39 / 0,34	10,93 / 18,88	0,4	18,26 / 19,58	0,39 / 0,35	10,95 / 17,67
0,0816	16,27 / 16,95	0,39 / 0,33	10,56 / 17,59	0,7	17,48 / 18,58	0,39 / 0,34	8,95 / 13,67

Примечание: плоскость изотропии  $\theta r$  – числитель,  $\theta z$  – знаменатель.

### Литература

[1] Зайцев А. В., Соколкин Ю. В., Фукалов А.А. Эффективные модули объёмного сжатия при плоской деформации двухфазных однонаправленно армированных композитов с анизотропными полыми и сплошными волокнами // Вестник ПНИПУ. Механика. 2011. № 4. С. 37–48.

## **ФУРЬЕ- И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ВИБРОУСКОРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ**

Зайцев А. В., Мильхин В. А., Мельников Д. Л., Судаков И. А., Шобей М. М.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[a-zaitsev@mail.ru](mailto:a-zaitsev@mail.ru), [maksim-shobey@yandex.ru](mailto:maksim-shobey@yandex.ru)

Оценка работоспособности подшипников качения для авиационных двигателей состоит в определении их долговечности и безопасного ресурса. Одним из факторов, определяющих ресурс двигателя, является долговечность подшипниковых опор. Поэтому возникает потребность в разработке новой методики испытаний подшипниковых сталеи и проведения уточненных расчетов долговечности в пределах установленного ресурса. Еще одним фактором, влияющим на долговечность подшипников, является реализация требуемых условий смазочной среды. Из-за нарушения в системе подачи смазки, например, может возникнуть кратковременный режим сухого трения с мгновенным повышением температуры. В результате на поверхности тела качения и на дорожке качения кольца подшипника возникают множественные локализованные дефекты небольшой глубины. Эти каверны являются начальными концентраторами и причинами появления зарождающихся усталостных трещин. Развитие процесса контактного усталостного выкрашивания материала шарика и/или дорожки качения в результате циклического воздействия может быть исследовано по результатам обработки сигналов вибропреобразователей. Для исследования механизмов и закономерностей подобного механического поведения проведены испытания деталей подшипников с модельными (нанесенными искусственно на поверхность) локализованными поверхностными дефектами.

Проведены натурные испытания бездефектного роликового подшипника NU206W на специально сконструированном в лаборатории «Трибодиагностика и контактная прочность» Пермского национального исследовательского университета стенде ДМ–28 при частотах вращения 1070, 2060 и 3040 об/мин, и нагрузке 215 Н. Количество тел качения диаметром 7,5 мм было равно 13. На корпус исследуемого подшипника был установлен вибропреобразователь DV–1 21.0, входящий в состав системы вибромониторинга ТИК RVM. Были зарегистрированы сигналы виброускорения при испытании бездефектного подшипника течение 2 с. Далее подшипник, с которым проводились испытания, был демонтирован. С помощью электрографического карандаша на внутренне кольцо был нанесен дефект шириной 600 мкм и длиной 20 мм. После нанесения дефекта проведены повторные испытания при той же нагрузке, на тех же частотах вращения и. Были получены сигналы виброускорения при испытании подшипника с дефектом длительностью 2 с.

Проведен спектральный (Фурье-анализ) сигналов виброускорения и анализ с помощью непрерывных вейвлет-преобразований Mexican Hat, Paul, Gabor и Morlet. В результате проведенного анализа построен «портрет виброускорений» бездефектного роликового подшипника, подтверждена частота вращения ротора, а также идентифицированы частоты, связанные с локализованным модельным дефектом на внутреннем кольце.

## ДЕФОРМАЦИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ФЕРРОЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Закинян А.Р.<sup>1</sup>, Кононенко Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Кавказский Федеральный университет, Ставрополь  
[zakinyan.a.r@mail.ru](mailto:zakinyan.a.r@mail.ru), [daria.emerald8@gmail.com](mailto:daria.emerald8@gmail.com)

Динамика процесса деформации капель жидкости, а также их взаимодействие во внешнем поле представляют широкий научный интерес [1, 2]. В частности, одной из традиционных задач физики феррожидкостей является задача о фигурах равновесия капель в магнитном поле. Достаточно подробно были рассмотрены равновесные конфигурации, а также динамика изменения формы отдельных капель феррожидкости [3]. Протекание данных процессов в системе взаимодействующих капель является малоизученным. Характеристики процессов определяются такими факторами как магнитные взаимодействия, межфазное натяжение и гидродинамические силы.

В данной работе рассмотрены процессы динамики формы в системе двух и трех взаимодействующих капель феррожидкости при наложении на них стационарного однородного магнитного поля. Показано, что на начальных временах воздействия внешнего поля наблюдаются осцилляции формы капель (рис. 1). Эти колебания вызваны инерционными эффектами и наиболее выражены в условиях близкого расположения капель, где гидродинамическое взаимодействие оказывает значительное влияние на их относительное движение.



Рис. 1. Монослой капель феррожидкости в последовательные моменты времени после приложения однородного магнитного поля.

### Литература

- [1] S. Torza, R.G. Cox, S.G. Mason, Electrohydrodynamic deformation and burst of liquid drops, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* 269 (1971) 295–319, <https://doi.org/10.1098/rsta.1971.0032>.  
[2] P.M. Vlahovska, Electrohydrodynamics of drops and vesicles, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 51 (2019) 305–330, <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-050120>.  
[3] E. Blums, A. Cebers, M.M. Maiorov, *Magnetic Fluids*. de Gruyter, New York, 1997.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ФЕРРОЖИДКОСТЯХ В МАГНИТНОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Закинян А.Р.<sup>1</sup>, Орехова С.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь  
[smorekhova@mail.ru](mailto:smorekhova@mail.ru)

Одновременное воздействие магнитного и электрического полей на феррожидкости представляет фундаментальный интерес и может иметь ряд многообещающих нетривиальных применений.

Была экспериментально исследована нестабильность межфазной поверхности в двухслойной системе жидкостей, в которой нижний слой представлен проводящей феррожидкостью, а верхний - диэлектрической немагнитной жидкостью. Межфазная нестабильность возникает в результате совместного действия магнитного и электрического полей, перпендикулярных границе раздела. Определены значения критической напряженности магнитного поля и электрического напряжения, а также продемонстрирована взаимосвязь между этими значениями (рис. 1).

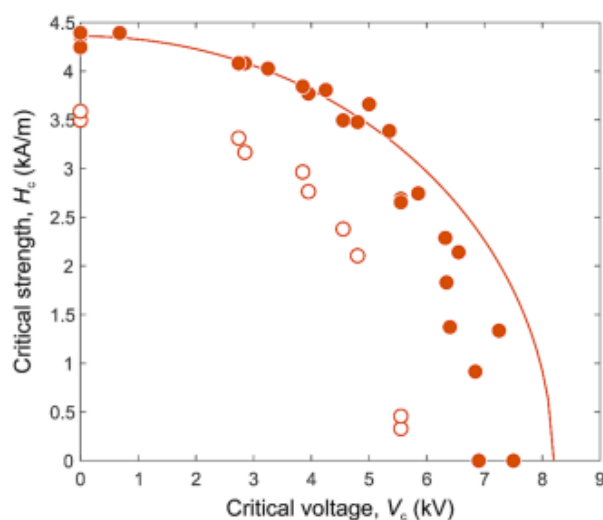


Рисунок 1 - Диаграмма критических значений напряженности магнитного поля и электрического напряжения, соответствующих возникновению нестабильности межфазной границы между феррожидкостью и немагнитной жидкостью.

Также проведены эксперименты, направленные на изучение электроконвекции в тонком слое феррожидкости. Выявлено, что внешнее магнитное поле (напряженностью  $< 10$  кА/м), параллельное электрическому полю снижает пороговое напряжение для возникновения электроконвекции и время его возникновения (до 50 %), а также создает более разветвленную структуру электроконвективных потоков в слое магнитной наножидкости. Магнитное поле, перпендикулярное электрическому, увеличивает порог развития электроконвекции (до 15 %) и приводит к вырождению электроконвективной картины в систему полос, параллельных магнитному полю. Выявлено, что критическое напряжение возрастает с увеличением толщины слоя магнитной наножидкости и частоты.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫХ МНОГОЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ

Зверев В.С.<sup>1</sup>, Кузнецов А.А.<sup>2</sup>, Канторович С.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

<sup>2</sup> *Венский университет, Вена*

[vladimir.zverev@urfu.ru](mailto:vladimir.zverev@urfu.ru)

За последнее время благодаря задачам из области биоинженерии и медицины новый стимул к развитию получили нанотекстурированные материалы, свойствами которых можно управлять при помощи внешних стимулов, в том числе и магнитным полем. Примером таких материалов являются магнитные жидкости, состоящие из магнитных однодоменных наночастиц, диспергированных в немагнитных жидких средах-носителях. В качестве замены однодоменным магнитным частицам были предложены другие, более сложные виды магнитных объектов, в частности, магнитные многоядерные наночастицы (ММНЧ) [1].

Доклад посвящен свойствам магнитной динамической восприимчивости ММНЧ на переменное плоскополяризованное магнитное поле малой амплитуды, при этом многоядерная наночастица имеет эллипсоидальную форму. ММНЧ моделируется как группа сферических субчастиц, чьи пространственные расположения относительно друг друга фиксированы. Это соответствует ситуации внедрения наночастиц в полимер или другую немагнитную жёсткую матрицу. Компьютерное моделирование методом молекулярной динамики с использованием программного продукта ESPResSo с учетом магнитной анизотропии. Метод основан на модели, предложенной в [2]. Основная идея заключается в том, что ориентация магнитного момента в субчастице определяется решением стохастического уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта, записанного в неподвижной относительно тела системе отсчёта частицы, после исключения прецессии и условия эффекта Барнетта. Совокупность однодоменных частиц формировались таким образом, чтобы их совместная выпуклая оболочка приближалась к вытянутому эллипсоиду вращения с заранее заданным соотношением полуосей, что позволяет сравнить полученное поведение с частицами сферической формы. Результаты согласуются с ранее проведенными вычислительными экспериментами [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 25-22-00338.

### Литература

- [1] Trisnanto S. B., Takemura Y. Effective Néel relaxation time constant and intrinsic dipolar magnetism in a multicore magnetic nanoparticle system //Journal of Applied Physics. – 2021. – Т. 130. – №. 6.
- [2] Shliomis M. I., Stepanov V. I. Rotational viscosity of magnetic fluids: contribution of the Brownian and Néel relaxational processes //Journal of magnetism and magnetic materials. – 1993. – Т. 122. – №. 1-3. – С. 196-199.
- [3] Pyanzina E. S. et al. Dynamic Magnetic Response of Multicore Particles: The Role of Grain Magnetic Anisotropy and Intergrain Interactions //Journal of Molecular Liquids. – 2025. – С. 126842.

## МАГНИТНАЯ ГИПЕРТЕРМИЯ В СИСТЕМАХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Зубарев А.Ю., Искакова Л.Ю.

*Уральский федеральный университет, Екатеринбург*  
[a.j.zubarev@urfu.ru](mailto:a.j.zubarev@urfu.ru), [larisa.iskakova@urfu.ru](mailto:larisa.iskakova@urfu.ru)

Влияние взаимодействия магнитных частиц может существенно изменять величину продуцируемого ими магнито-гипертермического эффекта, что необходимо учитывать при практической организации этого метода терапии опухолевых заболеваний. Однако результаты исследований этого влияния, представленные в литературе, даже качественно противоречивы – одни из них демонстрируют усиление этого эффекта, благодаря магнитным взаимодействиям частиц, другие – его ослабление. В ряде экспериментальных и компьютерных исследований отмечалась немонотонная зависимость продуцируемого теплового эффекта от концентрации частиц.

Нам предложена теоретическая модель динамики перемагничивания и магнито-гипертермического эффекта в системах взаимодействующих однодоменных феррочастиц. Известно, что в биологических средах магнитные наночастицы часто объединяются в кластеры с различной, во многом случайной морфологией расположения частиц. Присутствие таких кластеров очень сильно усложняет задачу математического исследования коллективного отклика частиц на переменное магнитное поле. Поэтому, чтобы получить физические результаты в максимально прозрачном виде, мы рассмотрели простейшую модельную ситуацию пространственно однородного «газа» магнитных частиц (аналог – газ Ван дер Ваальса) иммобилизованных в немагнитной среде с осями магнитной анизотропии параллельными внешнему осциллирующему полю. Исследование проводилось на основе решения уравнения Фоккера-Планка для функции распределения по ориентациям магнитных моментов частиц. Были определены реальная и мнимая компоненты динамической восприимчивости композита и, на их основе, определена интенсивность  $P$  выделения тепла частицей под действием магнитного поля. Эта величина прямо пропорциональна равновесной магнитной восприимчивости композита и немонотонно, с максимумом, зависит от времени  $\tau$  релаксации намагниченности частицы. Анализ показал, что время  $\tau$  монотонно растет с концентрацией  $\Phi$  магнитных частиц и с безразмерной энергией  $\lambda$  их магнитного взаимодействия. В результате, при заданной частоте  $\omega$  поля, интенсивность  $P$  тепловыделения немонотонно, с максимумом, зависит от  $\Phi$  и  $\lambda$ . При относительно малых частота  $\omega$  величина  $P$  растет с  $\Phi$  и  $\lambda$ , при больших – уменьшается.

Представляется, что полученные результаты позволяют, хотя бы принципиально, понять причину качественных противоречий между представленными в литературе результатами исследований влияния межчастичных взаимодействий на величину магнито-гипертермического эффекта – проводимые исследования соответствовали различным областям частот поля и характеристик ансамблей магнитных частиц.



## ГИСТЕРЕЗИС ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАГНИТНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ

Зубарев А.Ю.<sup>1</sup>, Степанов Г.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург

<sup>2</sup>Государственный научный центр РФ «ГНИИХТЭОС», Москва

[a.j.zubarev@urfu.ru](mailto:a.j.zubarev@urfu.ru), [gstepanov@mail.ru](mailto:gstepanov@mail.ru)

Нами были проведены экспериментальные исследования одноосного растяжения и сжатия цилиндрического образца магнитного эластомера в постоянном однородном магнитном поле, параллельном оси образца. Образцы были синтезированы на основе силиконового полимера марки СИЭЛ отверждающегося с платиновым катализатором (производство АО «ГНИИХТЭОС», в который были внедрены частицы пермаллоя, полученные методом механохимического синтез, сплавлением порошков карбонильного железа и карбонильного никеля (Fe-85, Ni-15% масс) со средним диаметром 10-15 мкм и объемной концентрацией 36, 27 и 23 %. Начальные модули Юнга магнитных эластомеров - 8, 15, 20 кПа. Длина образцов была 21мм, диаметр 8.5мм. Образцы подвергались циклическим сжатиям и растяжением вдоль своей оси с максимальной величиной изменения оси равной 20 % от ее первоначальной длины. Измерялась зависимость упругого напряжения в образце от величины его деформации. Измерения проводились в магнитном поле в диапазоне от нуля до 280 мТл. В отсутствии поля связь напряжение-деформация была практически линейна во всей области изменения деформации образца. При увеличении поля кривая этой зависимости образовывала широкий гистерезис, площадь которого увеличивалась с полем. Измеряемое механическое напряжение становилось равным нулю при конечной положительной (остаточной) деформации.

Для объяснения наблюдаемых эффектов предложена модель, основанная на том, что в магнитном поле частицы композита образуют объемные или разветвленные кластеры. Предполагалось, что в силу адгезионного взаимодействия частиц и окружающего полимера, вблизи частиц образуются «шубы» с повышенной концентрацией полимера, обладающие большей механической жесткостью, чем основной объем полимера. При сближении намагниченных в поле частиц «шубы» могут перекрываться, приводя к сцеплению частиц.

При растяжении образца вначале основную роль в формировании макроскопического напряжения играют упругие эффекты в межчастичных щелях, заполненных перекрывающимися «шубами». При увеличении растяжения «шубы» частиц, находящихся на оси растяжения, расцепляются и упругость композита определяется упругостью полимера в пространстве между «шубами», примерно равной его упругости вне межчастичных щелей. Важно, что, в силу несжимаемости композита, его растяжение вдоль оси вызывает сжатие в радиальном направлении. Это сжатие может вызвать смещение находящихся рядом и сбоку частиц в щель между расходящимися частицами, расположенными вдоль оси деформирования. При смене знака деформирования образца (в начале цикла сжатия) эти «боковые» частицы могут застревать в образовавшихся щелях, препятствуя сжатию образца при данном внешнем напряжении. Анализ показывает, что это обстоятельство может привести к широкому гистерезису кривой напряжение – деформация и к появлению остаточных положительных деформаций.

Теоретические результаты количественно воспроизводят результаты экспериментов.

## ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕПОЧЕЧНЫХ АГРЕГАТОВ В СУСПЕНЗИИ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Иванов А.О.<sup>1</sup>, Соловьева А.Ю.<sup>1</sup>, Елфимова Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург  
[Alexey.Ivanov@urfu.ru](mailto:Alexey.Ivanov@urfu.ru)

Формирование цепочечных агрегатов в феррожидкостях является общепризнанным явлением, отсылка к которому применяется повсеместно для эмпирического объяснения практически любых аномалий в физико-химико-механических свойствах феррожидкостей и феррокомпозитов. Поскольку прямое экспериментальное исследование образования цепочек феррочастиц невозможно в силу их малого размера, основные сведения о закономерностях этого процесса получены путем компьютерного моделирования. Ссылки на некоторые знаковые публикации по предмету приведены в статье [1]. Естественно, что значительное количество теоретических работ также было посвящено описанию процесса формирования цепочечных агрегатов, основные публикации по теме указаны в статье [2]. Однако отличительной особенностью массива теоретических работ является рассмотрение феррочастиц как шаров с точечным магнитным диполем, жестко закрепленным в центре. При этом во всех известных теоретических работах пренебрегается суперпарамагнитными флуктуациями в направлениях магнитных моментов феррочастиц, а значит пренебрегается степенями свободы, связанными с вращением магнитных моментов внутри феррочастиц.

Настоящая работа посвящена изучению равновесного формирования цепочечных агрегатов в суспензии суперпарамагнитных наночастиц, моделируемых однородно намагниченными шарами, взаимодействующими между собой посредством диполь-дипольного потенциала. При этом суперпарамагнитные флуктуации описываются как возможность вращения магнитных моментов внутри наночастиц в потенциальном поле энергии магнитной анизотропии Нееля. Равновесное формирование цепочек описывается в рамках метода функционала плотности свободной энергии [2], как баланс («игра») между проигрышем в энтропии и энергетическим выигрышем при сцеплении наночастиц по типу «голова-хвост» за счет магнито-дипольных сил. Теоретически доказано, что учет суперпарамагнитных степеней свободы для вращающихся магнитных моментов не оказывает влияния на распределение цепочек по числу включенных в них наночастиц. В качестве «экспериментального» подтверждения использовано компьютерное моделирование методом Монте Карло. Большой объем проведенных расчетов для различных величин энергии анизотропии подтвердил указанный выше теоретический вывод: начальная магнитная восприимчивость суспензии интенсивно взаимодействующих суперпарамагнитных наночастиц не зависит от энергии анизотропии, и данные компьютерного моделирования весьма точно описываются комбинацией выражения, полученного в рамках модели гибких цепочек [2], с подходом «модифицированной модели среднего поля» [3], используемой для учета дальнедействующего взаимодействия между всеми частицами в образце.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-12-00039.

### Литература

- [1] Camp P.J., Ivanov A.O., Sindt J.O. How chains and rings affect the dynamic magnetic susceptibility of a highly clustered ferrofluid // *Physical Review E*. – 2021. – V. 103, Iss. 6. – art.num. 062611.
- [2] Mendeleev V.S., Ivanov A.O. Ferrofluid aggregation in chains under the influence of a magnetic field // *Physical Review E*. – 2004. – V. 70, Iss. 5. – art.num. 051502.
- [3] Ivanov A.O., Solovyova A.Yu., Elfimovs E.A. The effect of magnetic field on the orientational ordering of easy magnetization axes in superparamagnetic nanoparticles // *Journal of Molecular Physics*. – 2024. – V. 400. - art.num.124493.

## КОНФИГУРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ОПОРЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Иванов А.С.<sup>1</sup>, Косков М.А.<sup>1</sup>, Крыласова О.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук»  
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского  
федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук,  
г. Пермь*

[lesnichiy@icmm.ru](mailto:lesnichiy@icmm.ru), [koskov.m@icmm.ru](mailto:koskov.m@icmm.ru), [krylasova.o@icmm.ru](mailto:krylasova.o@icmm.ru)

Одним из этапов создания и конструирования магнитожидкостных опор и датчиков является расчет градиентного магнитного поля, которое создает система постоянных магнитов. Данный расчет помогает рассчитать силы, которые действуют на тело, находящееся в слое магнитной жидкости, а также понять каким образом распределена магнитная жидкость в зазоре. Актуальной прикладной задачей является проектирование одноосного магнитожидкостного акселерометра, инертный элемент которого находится в подвесе из магнитной жидкости [1]. Такой элемент может состоять из системы кольцевых или дисковых магнитов, которые намагничены аксиально [2]. В [3] исследуется задача, геометрия которой является имитацией чувствительной к силам инерции механической части инерционных одноосных магнитожидкостных датчиков. В экспериментальной части данной работы показано, что принципиально одинаковые сборки, представляющие собой чередование дисковых или кольцевых магнитов и немагнитных вставок, по-разному удерживают жидкость в зазоре между магнитной сборкой и немагнитной стенкой. Целью данной работы стало исследование распределения модуля напряженности магнитного поля вблизи магнитожидкостной опоры, состоящей из дисковых или кольцевых постоянных магнитов. Задача решается в самом простом приближении, при котором не учитываются поверхностные эффекты: в таком случае свободная поверхность магнитной жидкости есть поверхность постоянного значения напряженности магнитного поля [4]. Моделирование конфигурации магнитного поля производилось с помощью программы FEMM (Finite Element Method Magnetics). Для моделирования поля вблизи магнитожидкостной опоры были выбраны два случая, при котором зазор может быть заполнен частично или полностью. В описанном приближении заполнение зазора производилось по изолиниям напряженности магнитного поля. Для проверки результатов моделирования рассчитывалась магнитная энергия системы. Энергетически выгодным оказалось состояние, при котором зазор заполнен частично ( $W_{\text{част}} = 0.07753$  Дж,  $W_{\text{спл}} = 0.07755$  Дж). Результаты полученные при построении модели согласуются с экспериментом, что позволяет использовать такой подход для подбора параметров подобных систем в дальнейшем.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

### Литература

- [1] Qian L., Li D. Use of Magnetic Fluid in Accelerometers //J. of Sensors. 2014. No. 375623.
- [2] Ряполов П. А. и др. Динамика газожидкостной магнитной системы в неоднородном поле кольцевого магнита //Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2019. – Т. 9. – №. 3. – С. 79-87.
- [3] Иванов А.С., Косков М.А., Сомов С.А. Сила трения коаксиального слоя магнитной жидкости при равномерном поступательном движении стенок / VIII Ставропольская международная конференция по магнитным коллоидам, 10-14 сентября 2023 г., сбор. труд. //Ставрополь: СКФУ, 2023. – С. 64-66.
- [4] Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков, М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ МАКЕТА МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ИНЕРЦИОННОГО ДАТЧИКА**

Иванов А.С., Косков М.А., Сомов С.А.

*Институт механики сплошных сред (ПФИЦ УрО РАН), г. Пермь*  
[lesnichiy@icmm.ru](mailto:lesnichiy@icmm.ru), [koskov.m@icmm.ru](mailto:koskov.m@icmm.ru), [somov.s@icmm.ru](mailto:somov.s@icmm.ru)

Интерес к инерционным магнитожидкостным датчикам обусловлен одновременно относительной простотой их конструкции и технологии производства, и высокой чувствительностью. Так как устройства являются электромеханическими, основное их предназначение — регистрация низкочастотных сигналов, что позволяет создавать датчики квазистатические регистраторы сил, регистраторы перемещений (сейсмодатчики) и регистраторы импульса силы (баллистические датчики).

На предыдущем этапе нами была предложена конструкция [1] датчика, обладающего линейным выходным сигналом. Принцип работы датчика основан на регистрации движения инертной массы, отклоняющейся от положения равновесия под действием внешней силы, подлежащей измерению. Измерительная подсистема датчика реализована в виде оптической схемы, что исключает её взаимодействие с телом и с системой магнитного подвеса посредством магнитного поля (распространённый недостаток ранних конструкций). Датчик обладает цилиндрической симметрией. Инертная масса, состоящая из кольцевых постоянных магнитов, левитирует в коаксиальном слое магнитожидкостной смазки. Был создан макет устройства, испытанный на вибростенде. Основной вывод, который можно было сделать из измерений - это полное соответствие конструкции датчика модельным представлениям о линейной колебательной системе с одной степенью свободы.

Возможности инерционных датчиков определяются их конструктивными особенностями и физическими процессами, наблюдаемыми в коаксиальном слое магнитной жидкости. Во многом именно гидродинамика последней определяет диссипативные и селективные свойства колебательной системы датчика. В этой связи экспериментальное и численное исследование гидродинамики магнитной жидкости является актуальной задачей, на решение которой была направлена эта работа.

### Литература

[1] Koskov M.A., Somov S.A., Krylasova O.S., Ivanov A.S. Inertial ferrofluid sensor for vibration, displacement and impulse measurement with linear output signal // Problems of the Regional Energetics, 2024 No. 4(64), p. 80-89. doi: 10.52254/1857-0070.2024.4-64.07

## ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ С ТЕТРАЭДРАЛЬНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Иванов М.В.<sup>1</sup>, Михайлов А.А.<sup>1</sup>, Антонова О.В.<sup>1</sup>, Кузьмин В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ООО «Тетрал», Санкт-Петербург

*ivanov.m@compmechlab.ru, michailov@compmechlab.com,*

*antonova\_ov@spbstu.r, v.kuzmin@tetral.ru*

В связи с возрастающим интересом со стороны строительной отрасли к применению металлических панелей с различными видами заполнителя [1] в составе конструкции зданий и сооружений, становятся актуальными исследования, направленные на оптимизацию характеристик таких панелей и расчётное обоснование их применения. Ключевой особенностью таких исследований является применение методов математического моделирования, использование современного программного обеспечения и методов оптимизации.

Данное исследование посвящено оценке влияния различных толщин листов внешних слоев панели и металлического заполнителя сложной пространственной формы на величину несущей способности панели.

Разработана параметрическая оболочечная модель панели с ферменным заполнителем, учитывающая сложную пространственную структуру заполнителя. Сформулирована и решена задача параметрической оптимизации. Рассматривалась панель под действием изгибающей нагрузки [2]. В качестве целевой функции была выбрана величина несущей способности панели. Ограничения были выбраны из условий и описания технологического процесса изготовления заполнителя [3].

В результате были определены характерные закономерности и получены графики зависимости величины несущей способности панели с тетраэдральным заполнителем от значений толщины несущих листов и листов, используемых для изготовления заполнителя. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для оптимизации технологического процесса изготовления заполнителя сложной формы.

### Литература

[1] Найшут Ю.С. Сотовые строительные конструкции. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 1998. 140с.

[2] Antonova, O.V., Ivanov, M.V., Mikhailov, A.A., Kuzmin, V.A. Tetrahedral core sandwich panels behavior under bending loading Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2817(1), 012001

[3] Кузьмин В.А. Способ изготовления заполнителя с ферменной объёмной структурой и многослойных панелей на его основе. Пат. № 2710177С1 Российская Федерация, МПК В32В 7/00, В32В 15/00, В32В 3/12. Заявитель и патентообладатель Кузьмин В.А. № 2019106952: заявл. 12.03.2019; опубл. 24.12.2019

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МНОГОКРАТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИН ИЗ СПЛАВОВ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА**

Иванов С.Ю.<sup>1</sup>, Степанов Н.Д.<sup>1</sup>, Жеребцов С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
Санкт-Петербург  
[sergei.yu.ivanov@gmail.com](mailto:sergei.yu.ivanov@gmail.com)*

Лазерное ударное деформирование (ЛУД) - это бесконтактный процесс формовки листового металла, при котором генерируемая сфокусированным лазерным лучом ударная волна используется для точного изгиба, придания формы, точного выравнивания или ремонта оболочечных конструкций. В процессе лазерного ударного воздействия, который обычно проводится в наносекундном режиме, генерируемые ударные волны создают благоприятные остаточные напряжения сжатия в приповерхностной зоне, а также могут изменять кривизну образца. Путем варьирования технологических параметров процесса ЛУД можно получить сложные формы поверхности, которые трудно достичь с использованием методов прессовой формовки. Целью работы является разработка численной модели процесса лазерного ударного деформирования (ЛУД) крупногабаритных конструкций, учитывающей взаимосвязь основных технологических параметров процесса ЛУД и механических свойств обрабатываемого материала с результирующим напряженно-деформированным состоянием. Использование для решения задачи метода собственных деформаций позволило существенно сократить время счета. Было установлено, что характер деформирования пластины при ЛУД зависит от уровня и характера распределения пластических деформаций в объеме обрабатываемого материала. Анализ процесса ЛУД пластины толщиной 1 мм из различных конструкционных сплавов показал, что (i) наибольший уровень остаточных деформаций был достигнут при ЛУД пластины из титанового сплава Ti-6Al-4V; (ii) пластина из сплава IN718 перестает деформироваться уже после второго слоя лазерной ударной обработки; (iii) в процессе ЛУД алюминиевого сплава AA2024 происходит изменение знака кривизны пластины, сопровождающееся изменением ее формы с выпуклой на вогнутую. Анализ влияния технологических параметров процесса ЛУД пластины из титанового сплава Ti-6Al-4V показал, что (i) при постоянном давлении ударной волны единичного лазерного воздействия пластина деформируется неравномерно в процессе ЛУД, максимальное приращение деформаций соответствует первым двум слоям лазерной обработки; (ii) послойное увеличение давления ударной волны единичного лазерного воздействия позволяет получить практически линейное увеличение приращения деформаций с каждым слоем, а также обеспечить получение большего уровня остаточных деформаций, чем при обработке с постоянным уровнем давления.

## ОЦЕНКА НДС КРУПНОГАБАРИТНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ОТВЕРЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КОСМОСА

Иванов Я.Н.<sup>1</sup>, Кондюрин А.В.<sup>2</sup>, Пестренин В.М.<sup>1</sup>, Пестренина И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный университет, Пермь

<sup>2</sup>Ewingar Scientific, Ewingar, Australia

[ivanovya@psu.ru](mailto:ivanovya@psu.ru), [alexey.kondyurin@gmail.com](mailto:alexey.kondyurin@gmail.com), [pestreninvm@mail.ru](mailto:pestreninvm@mail.ru), [ipestrenina@gmail.com](mailto:ipestrenina@gmail.com)

Изучается напряженно деформированное состояние (НДС) и формоизменение крупногабаритной цилиндрической оболочки из композитного материала, отверждаемой в условиях космоса [1, 2] под действием солнечного излучения и энергетического потока от Земли.

Особенностью рассматриваемой задачи является зависимость механических свойств связующего материала конструкции от температуры, а также от степени отверждения. Причем для фиксированной степени отверждения при изменении температуры процессы в элементах конструкций из композитов оказываются обратимыми. Например, обратимыми оказываются процессы в полностью отвержденных полимерах в расчетах остаточных температурных напряжений [3]. Однако процессы, в которых происходит изменение степени отверждения, являются необратимыми. Отверждение связующего материала конструкции описывается кинетическим уравнением [4].

В работе впервые предложена численная методика исследования НДС рассматриваемой конструкции, учитывающая оба эти фактора. Изучаются три возможных состояния оболочки в космическом пространстве: без энергетического воздействия на нее Земли, с учетом воздействия Земли и с учетом энергетического воздействия искусственного сооружения.

Показано, что во всех случаях возникающие в процессе отверждения напряжения не превышают критических прочностных значений. Искажение поперечных сечений незначительно, не превышает 0,4% по отношению к диаметру. Максимальная деформация изгиба характеризуется стрелой прогиба 0,12% относительно длины цилиндра. Изучен спектр низших собственных частот свободных колебаний. Показано, что значения 11 низших частот близки, что обеспечивает возможность их энергетического взаимодействия. В процессе отверждения значения частот свободных колебаний возрастают, что может быть использовано для анализа полноты отверждения конструкции на орбите.

### Литература

- [1] Kondyurin A. Design and Fabrication of Large Polymer Constructions in Space // Elsevier, –2022. – P. 630. doi:10.1016/B978-0-12-816803-5.00001-X.
- [2] Kondyurin A.V., Rusakov S.V., Pestrenin V.M., Pestrenina I.V. Curing of large prepreg shell in solar synchronous Low Earth Orbit: Precession flight regimes // Acta Astronautica, – 2018. –N 151.– P. 342–347. doi:10.1016/j.actaastro.2018.06.029
- [3] Остаточные напряжения в полимерных композиционных материалах: учебное пособие/В.П. Матвеевко, О.Ю. Сметанников, Н.А.Труфанов, И.Н.Шардаков–Пермь: из-во нац.исслед.полите.ун-та,–2016 - 251 с.
- [4] Кондюрин А.В., Пестренин В.М., Пестренина И.В., Ландик Л.В. Феноменологическое кинетическое уравнение конверсии связующего композиционных материалов на основе изотермических испытаний // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023.– №1. – С. 66–74. doi:10.15593/perm.mech/2023.1.07

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Изюмова А.Ю., Бартоломей М.Л., Вшивков А.Н., Плехов О.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[fedorova@icmm.ru](mailto:fedorova@icmm.ru), [bartolomei.m@icmm.ru](mailto:bartolomei.m@icmm.ru), [vshivkov.a@icmm.ru](mailto:vshivkov.a@icmm.ru), [poa@icmm.ru](mailto:poa@icmm.ru)

Лазерная ударная обработка (ЛУО) является одним из способов упрочнения поверхности деталей и конструкций наряду с дробеструйной обработкой, термическим лазерным упрочнением, пластическим выглаживанием и проч. Эффект, лежащий в основе технологии ЛУО и заключающийся в способности высокоэнергетического лазерного импульса генерировать ударные волны, был открыт и исследован в 1960-х годах [1, 2]. Преимуществами ЛУО являются управляемость параметров источника воздействия, малая тепловая нагрузка на материал, возможность применения на различной геометрии деталей. ЛУО криволинейной поверхности имеет ряд особенностей, связанных с формой проекции лазерного пятна на обрабатываемую поверхность, направлением распространения ударной волны внутри обрабатываемого материала, ее вероятными переотражениями и, соответственно, создаваемой конфигурацией поля остаточных напряжений. Исследование этих особенностей позволяет определять оптимальные и эффективные режимы ЛУО для деталей сложной геометрии.

Основной целью данной работы было установить влияние двух режимов ЛУО, отличающихся плотностью мощности лазерного воздействия, схемой размещения и формой отпечатков лазерного луча, на формирование поля остаточных напряжений в цилиндрических образцах из титанового сплава Вt1-0.

В результате численного моделирования показано, что оба исследованных режима ЛУО формируют поле сжимающих остаточных напряжений на глубину порядка 1 мм. При этом, режим ЛУО с использованием одного прохода луча с квадратной формой отпечатка без перекрытия (стык в стык) и плотностью мощности воздействия  $10 \text{ ГВт/см}^2$  формирует поле сжимающих остаточных напряжений с максимальной амплитудой 650 МПа на глубине 0,2 мм; режим ЛУО с использованием лазерного луча круглого сечения при размещении отпечатков с перекрытием 30% и плотностью мощности  $6,4 \text{ ГВт/см}^2$  позволяет добиться сжимающих остаточных напряжений с максимальной амплитудой 400 МПа на глубине 0,3 мм от поверхности образца. Этот результат согласуется со структурными исследованиями, которые указывают на большую плотность деформационных двойников в поверхностном слое после ЛУО в режиме с квадратным лазерным пятном, что предположительно может свидетельствовать о большей степени пластической деформации, вызванной более мощным лазерным ударным воздействием.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10168.

### Литература

- [1] Askar'yan G.A. and Moroz E.M. Pressure on Evaporation of Matter in a Radiation Beam // Sov. J. Exp. Theor. Phys. – 1962. – Vol. 43. – P. 2319–2320.
- [2] White R.M. Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption // Journal of Applied Physics. – 1963. – Vol. 34. – P. 2123–4.



## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АДДИТИВНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Ильиных А.В.<sup>1</sup>, Вильдеман В.Э.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь

[ilinih@yandex.ru](mailto:ilinih@yandex.ru), [wildemann@pstu.ru](mailto:wildemann@pstu.ru)

Аддитивные технологии – это современные технологии для производства деталей со сложной геометрией. Преимуществом данных технологий является возможность постепенного изготовления деталей с высокой точностью, что позволяет существенно уменьшить количество последующих операций механической обработки. Титановый сплав ВТ6 широко применяется при изготовлении деталей авиационной промышленности и имплантов в медицине. ВТ6 обладает хорошими механическими свойствами. Поэтому представляет большой интерес использование этого материала в качестве исходного сырья для аддитивного производства. Получаемые аддитивные материалы по механическим свойствам при статическом нагружении соответствуют материалам, получаемыми традиционными способами.

В условиях циклического нагружения аддитивные материалы пока уступают конструкционным материалам, получаемым традиционными способами. Это связано с множеством факторов, таких как межслоевые дефекты, остаточные напряжения, наведенная текстура, которые, в комплексе, определяют анизотропию механических свойств при циклическом нагружении. Поэтому изучение характеристик сопротивления усталости аддитивных материалов является одним из актуальных направлений научного исследования.

Целью работы является экспериментальное исследование характеристик сопротивления усталости аддитивного и оценка возможности прогнозирования циклической долговечности титанового сплава ВТ6, полученного методом трехмерной проволочно-дуговой наплавки (при использовании технологического процесса холодного переноса металла).

Представлены результаты циклических испытаний на растяжение и кручение образцов, вырезанных в разных направлениях по отношению к плоскости печати. Показано, что циклическая долговечность аддитивного сплава ВТ6 отличается на порядок в зависимости от ориентации образцов. Возможность прогнозирования характеристик сопротивления усталости рассматривается на основе модифицированной модели Сайнса [1,2], в которой в качестве параметров используются две кривые усталости при растяжении и кручении и пределы прочности при соответствующих видах статического нагружения. Исследуются вопросы использования в качестве параметров модели разных кривых усталости при растяжении и кручении, параметры которых зависят от направления вырезки образцов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00900)

### Литература

[1] Yankin, A.S., Lykova, A.V., Mugatarov, A.I., Wildemann, V.E., Ilinykh, A.V., Influence of additional static stresses on biaxial low-cycle fatigue of 2024 aluminum alloy, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 62 (2022) 180-193.

[2] Экспериментальные исследования усталостного поведения материалов при многоосных циклических воздействиях: монография / В.Э. Вильдеман, А.В. Ильиных, А.С. Янкин, А.В., Лыкова А.И. Мугатаров. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2022. – 113 с.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОРТЕЗОВ ИЗ ТЕРМОУСАЖИВАЕМЫХ ТРУБОК

Ильиных Г.В., Сметанников О.Ю., Фасхутдинова Ю.Б.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[gleb@ilinyh.ru](mailto:gleb@ilinyh.ru), [sou2009@mail.ru](mailto:sou2009@mail.ru), [fub26@mail.ru](mailto:fub26@mail.ru)

Реабилитация, как комплекс мероприятий, направленных на восстановление утраченных функций организма, включает в себя три этапа, соответствующих периодам течения заболевания: острому, восстановительному и периоду остаточных явлений [1]. При травмах конечностей на каждом из этапов реабилитации применяются ортезы, предназначенные для частичной или полной иммобилизации конечности. Однако использование серийных ортезов связано с рядом проблем, в частности с несоответствием размеров ортопедического изделия индивидуальным антропометрическим характеристикам человека и трудоёмкостью процесса использования за счёт дополнительных застёжек и фиксаторов. Использование гипсовых повязок также имеет ряд недостатков, в том числе вторичное смещение после спада отёка, большой вес, хрупкость материала [2].

Работа посвящена разработке ортеза, создаваемого из термоусаживаемой трубки, и предназначенного для консервативного лечения пациентов с повреждением кисти, в частности с закрытым переломом фаланги пальца.

В качестве материала термоусаживаемых трубок используется сшитый полиэтилен, характерным признаком которого является эффект памяти формы, позволяющий трубке под действием повышенной температуры возвращаться к исходным размерам. За счёт этого при усадке на забинтованную конечность трубка может принимать её анатомическую форму, что позволяет использовать ортез как на этапе полной иммобилизации, так и на этапе восстановления подвижности конечности.

Проведено численное моделирование осадения трубки на конечность человека с учётом нелинейного поведения мягких тканей. Рассмотрены ортезы различной конфигурации. Построен многопараметрический критерий оценки индивидуальной совместимости ортеза, учитывающий максимальное давление на конечность, распределение давления и значения изгибной жесткости полученного ортеза в ортогональных плоскостях. Проведён анализ влияния на результаты расчёта модификации конструкции за счёт дополнительной перфорации, а также изменения температурно-временного режима осадения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0006).

### Литература

- [1] International Classification of Impairments, Disabilities and Handicaps (ICIDH), Geneva, WHO, 1980.  
[2] Горбатов Р.О., Казаков А.А., Романов А.Д. Разработка технологии создания индивидуальных ортезов для иммобилизации суставов верхней конечности с помощью 3d-печати // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. - 2018. - Т. 15. - №3. - С. 124-128. doi: 10.19163/1994-9480-2018-3(67)-124-128

## КОНВЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МОДУЛИРОВАННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Казанцев П.Н., Смородин Б.Л.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*  
[kazantsevnp@yandex.ru](mailto:kazantsevnp@yandex.ru), [bsmorodin@yandex.ru](mailto:bsmorodin@yandex.ru)

Рассмотрена конвективная устойчивость стратифицированной магнитной жидкости, помещенной в ячейку Хеле-Шоу с соотношением толщины, длины и высоты 1:20:10. Ячейка расположена в неоднородном магнитном поле пары кольцевых магнитов  $\mathbf{H} = Gz\mathbf{k}$  [1] ( $G$  – градиент поля, зависящий от расположения магнитов и их характеристик). Кроме того катушки Гельмгольца, расположенные рядом с кольцевыми магнитами, могут создавать модуляцию поля по гармоническому закону с амплитудой  $\zeta$  и циклической частотой  $\omega$ . В ячейке сформирован градиент температур  $\nabla T = \Theta\mathbf{k}$  ( $\Theta$  – разница температур на гранях ячейки, ограничивающих ее по высоте).

Стратификация магнитных частиц в жидкости может быть вызвана за счет магнитофореза в неоднородном магнитном поле [2,3] или эффекта термодиффузии [3], обусловленного градиентом температур. Под действием магнитофореза в покоящейся магнитной жидкости формируется симметричный параболический профиль концентрации, характеризуемый величиной безразмерного градиента поля  $\gamma$ . Экстремум профиля концентрации смещается по вертикали за счет термодиффузии, интенсивность которой определяется коэффициентом разделения смеси  $\psi$ . В стратифицированной магнитной жидкости в постоянном поле ( $\zeta = 0$ ) могут возникать колебательные конвективные режимы в форме стоячей волны с частотой  $\omega_0$ . Увеличение степени концентрационной неоднородности магнитных частиц (повышение  $\gamma$ ) приводит к повышению порога устойчивости магнитной жидкости, а дополнительная стратификация за счет термодиффузии (в случае  $\psi > 0$ ) понижает порог конвекции.

С помощью метода Галеркина и применения теории Флоке проведен анализ устойчивости магнитной жидкости в переменном магнитном поле ( $\zeta \neq 0$ ). Получена зависимость критического магнитного числа Рэлея  $Rm_c$ , характеризующего порог конвекции, от обратной частоты внешнего поля  $1/\omega$ . Обнаружены субгармонические, синхронные и квазипериодические типы отклика. Для квазипериодических возмущений порог неустойчивости практически не зависит от частоты. Наиболее сильное понижение устойчивости имеет место в первой резонансной области с минимумом при  $\omega_0/\omega \approx 1/2$  и связано с субгармоническими возмущениями. Во второй резонансной области ( $\omega_0/\omega \approx 1$ ) нарастают возмущения синхронного отклика, а понижение порога менее выражено. Исследовано влияние  $\gamma$  (магнитофореза) и  $\psi$  (термодиффузии), а также амплитуды модуляции  $\zeta$  на границы устойчивости.

### Литература

- [1] Pshenichnikov A. F. Magnetic field in the vicinity of a single magnet. 1993 // Magnetohydrodynamics, Vol. 29. № 1. P. 33-36.
- [2] Shliomis M. I., Smorodin B. L., Kamiyama S. The onset of thermomagnetic convection in stratified ferrofluids // Philosophical Magazine. 2003. Vol. 83. № 17-18. P 2139-2153.
- [3] Shliomis M. I., Smorodin B. L. Convective instability of magnetized ferrofluids // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2002. Vol. 252. P 197-202.

## **ДИСКРЕТНЫЕ ПОДХОДЫ К ЭФФЕКТАМ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ. ИНЕРЦИЯ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ**

Казаринов Н.А.<sup>1,2</sup>, Волков Г.А.<sup>1,2</sup>, Петров Ю.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург  
n.kazarinov@spbu.ru*

Критерий разрушения на основе концепции инкубационного времени [1] был использован для аналитического исследования динамического старта трещин при коротких импульсных нагрузках. Особое внимание было уделено явлению задержки разрушения – фундаментальному эффекту, который можно наблюдать в экспериментах с короткими пороговыми импульсными нагрузками [2,3]. Эффект можно описать следующим образом: разрушение материала происходит после того, как локальные напряжения достигли своих максимальных значений, что означает. Кроме того, обсуждается простая аналогия между процессом старта трещины и разрушением линейного осциллятора, позволяющая приписать процессу разрушения инерцию. Также предлагается и исследуется модель разрушения на основе линейного осциллятора, применимая для описания старта трещины при динамическом воздействии и для моделирования откольного разрушения в условиях ударного нагружения. Модель позволяет исследовать ключевые эффекты динамического разрушения – возрастание прочности при росте скорости нагружения, а также задержку разрушения.

### Литература

- [1] N.A. Kazarinov, Y.V. Petrov, A.V. Cherkasov, Instability effects of the dynamic crack propagation process, *Engineering Fracture Mechanics* 242(1), 2021, 107438
- [2] J.F. Kalthoff, D.A. Shockey, Instability of cracks under impulse loads, *J. Appl. Phys.* 48, 1977, 986-993
- [3] A.N. Berezkin, S. I. Krivosheev, Yu. V. Petrov, A.A. Utkin, Effect of Delayed Crack Nucleation under Threshold Pulse Loading, *Doklady Physics* 45(11), 2000, 617-619

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ КАПЕЛЬ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Калюжная Д.А.<sup>1</sup>, Соколов Е.А.<sup>1</sup>, Ряполов П.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, Курск

[kalyuzhnaya.dariya@yandex.ru](mailto:kalyuzhnaya.dariya@yandex.ru), [evgeniysokolov1@yandex.ru](mailto:evgeniysokolov1@yandex.ru), [r-piter@yandex.ru](mailto:r-piter@yandex.ru)

Микромагнитофлюидика – это область микрофлюидики, которая исследует манипулирование небольшими объемами жидкостей в магнитном поле. Манипуляция магнитным полем является наиболее экономичным и бесконтактным способом, который не оказывает температурное или химическое влияние на формирование эмульсий [1]. Среди магниточувствительных эмульсий можно выделить эмульсию, одна из фаз которой представлена магнитной жидкостью (МЖ) [2]. Целью работы является исследование влияния магнитного поля, создаваемого прямоугольными ферритовыми магнитами, на динамику капель МЖ на водной основе, образующихся в масле в микрожидкостном канале.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Обе фазы вводятся в микрожидкостное устройство одновременно. В ходе эксперимента скорость потока масла – непрерывной фазы изменяется. Диапазон скоростей непрерывной фазы составляет 0.0054 мкл/с – 0.027 мкл/с. Дисперсионная среда подается с одинаковой скоростью, равной 0.0054 мкл/с. Перемещение ферритовых магнитов происходит вдоль оси микрофлюидного чипа. Максимальное значение напряженности магнитного поля между магнитами составляет 15.5 кА/м. В исходном положении (0) центры магнитов расположены напротив зоны смешивания двух жидкостей. Затем из нулевого положения прямоугольные магниты перемещаются влево на –6.5 мм или –3.5 мм, или вправо на +2 мм или +7 мм. Таким образом, размер капель магнитной жидкости регулируется с помощью изменения скорости потока непрерывной фазы и перемещения магнитов относительно зоны смешивания фаз в чипе.

Зависимость размера капель МЖ от скорости потока показала, что увеличение диаметра магнитных капель происходит за счет уменьшения расхода непрерывной фазы. Такая зависимость является классической для микрофлюидных исследований. Соотношение диаметров капель при максимальной и минимальной скоростях потока масла под воздействием магнитного поля равно 2. При отсутствии магнитного поля это соотношение равно 3. Зависимость диаметра капель МЖ от изменения положения магнитов показала, что максимальный диаметр капель магнитной жидкости наблюдается при нулевом положении магнитов при скорости потока масла 0.027 мкл/с. Также больший размер магнитных капель отмечается при смещении магнитов вправо на +2 мм при других расходах непрерывной фазы. Смещение максимума напряженности магнитного поля влияет на изменение размеров капель МЖ.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки систем транспортировки в микрофлюидных приложениях.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-22-00309)  
<https://rscf.ru/project/24-22-00309/>.*

### Литература

- [1] Li, J. Su K., Liu H., Zou Y., Recent Advances in Magnetically Actuated Droplet Manipulation for Biomedical Applications //Magnetochemistry. – 2024. – т. 10, № 4. – с. 28.
- [2] Ryapolov P., Vasilyeva A., Kalyuzhnaya D., Churaev A., Sokolov E., Shel'deshova E., Magnetic fluids: The interaction between the microstructure, macroscopic properties, and dynamics under different combinations of external influences //Nanomaterials. – 2024. – т. 14, № 2. – с. 222.

## **ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НАГРУЗКИ**

Каменских А.О.<sup>1</sup>, Лекомцев С.В.<sup>1</sup>, Матвеев В.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
kamenskikh.a@icmm.ru, lekomtsev@icmm.ru, mvp@icmm.ru*

Цилиндрическая пологая оболочка является конструктивно-подобным элементом обшивки аэрокосмической техники. Различные температурные условия эксплуатации и жёсткое закрепление приводит к существенным температурным напряжениям и в крайнем случае к потере устойчивости обшивки. Помимо изменения напряжённо-деформированного состояния оболочки температурные нагрузки сильно влияют и на её динамические характеристики: главным образом на спектр собственных частот. В данной работе с помощью метода конечных элементов рассматривается влияние температурных нагрузок на собственные частоты сегмента пологой цилиндрической оболочки в докритической и закритической области (до и после потери устойчивости).

Объектом исследования служит сегмент пологой цилиндрической оболочки, частным случаем которого является пластина. На оболочку действует температурная нагрузка, приводящая в совокупности с граничными условиями к возникновению напряжений и деформаций в теле. Рассматривается два варианта граничных условий: жёсткое закрепление оболочки по всем и по двум противоположным торцам. Использование уравнений нелинейной теории упругости позволяет произвести анализ собственных частот исследуемого объекта с учётом возникающих температурных напряжений, в том числе и после потери устойчивости. Численные расчёты выполнены с использованием метода конечных элементов в ПО ANSYS Mechanical APDL.

В результатах работы приводятся зависимости нормальных перемещений и низшей собственной частоты от температурной нагрузки для оболочек с различной кривизной. Анализ численных результатов позволяет сделать вывод, что при повышении температурной нагрузки низшая частота пологой оболочки снижается вплоть до момента потери устойчивости. После этого низшая форма колебаний выпадает из спектра, и дальнейшее повышение температурной нагрузки приводит к увеличению новой низшей частоты вплоть до момента пока не произойдёт очередная смена порядка собственных форм колебаний в спектре. Следует отметить, что на собственные частоты закреплённой по всем торцам оболочки с небольшой кривизной (частный случай — пластина) температурная нагрузка влияет значительно. Это приводит к тому, что потеря устойчивости конструкции по первой форме происходит при небольшой величине приращения температуры. С ростом параметра кривизны оболочки влияние температурной нагрузки на собственные частоты снижается.

Качественные изменения в спектре собственных частот колебаний оболочек от приращения температуры незначительно отличаются друг от друга при разных типах граничных условий. Основное различие проявляется в скорости изменения низшей собственной частоты от температурной нагрузки, которая выше у защемлённой по всем торцам оболочки. Это связано с тем, что данный вид граничных условий приводит к более быстрому росту температурных напряжений и деформаций. Представленные численные результаты демонстрируют возможность учёта влияния температурной нагрузки на собственные частоты колебаний и устойчивость оболочек и пластин.

## **КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Сенин А.Н.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
kamenskikh.a@icmm.ru, lekomtsev@icmm.ru, mvp@icmm.ru, senin.a@icmm.ru*

Оболочки и пластины широко используются в авиационной, аэрокосмической, автомобильной и других отраслях промышленности. На сегодняшний день технологии их производства позволяют встраивать в тонкостенные конструкции различные пассивные и активные элементы. Изделия, оснащённые сенсорами и актуаторами, приобретают возможность регистрировать деформации, а также изменять свои характеристики (геометрические, механические и динамические) в зависимости от условий эксплуатации, состояния окружающей среды и других важных факторов. В литературе имеется множество примеров smart-систем, построенных на основе пьезоэлектрических материалов [1, 2]. Для достоверного моделирования их динамического поведения необходимо учитывать предварительные (начальные) напряжения, возникающие в результате действия широкого класса нагрузок: механических, температурных, центробежных, аэро- и гидродинамических. Несмотря на большое количество практических приложений, исследования по данной тематике представлены ограниченным числом публикаций [3, 4].

В работе изложены математическая постановка и конечно-элементный алгоритм решения задачи о собственных и вынужденных гармонических колебаниях электроупругих пластин и оболочек, находящихся под действием статической нагрузки. Криволинейная поверхность тонкостенной конструкции при моделировании представляется в виде совокупности плоских сегментов. В каждом из них выполняются соотношения теории слоистых пластин и теории электроупругости, записанные для случая плоского напряжённого состояния. Деформации определяются с использованием нелинейных уравнений, которые линеаризуются относительно состояния с малым отклонением от положения начального равновесия, вызванного воздействием статических механических и электрических сил [4]. Достоверность численного решения, получаемого с помощью разработанного конечно-элементного алгоритма, подтверждена сравнением перемещений и собственных частот колебаний пластины с экспериментальными данными. В численных примерах оценено влияние статического давления и граничных условий на собственные частоты колебаний пластин и круговых цилиндрических оболочек с пьезоэлементами. Представленная математическая модель и численный алгоритм могут найти своё применение в задачах активного и пассивного демпфирования колебаний тонкостенных конструкций, которые в реальных условиях эксплуатации находятся под воздействием механических нагрузок различной природы.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

### Литература

- [1] Fleming A.J., Moheimani S.O.R. Piezoelectric transducers for vibration control and damping, 1<sup>st</sup> ed. – London: Springer, 2006. – 287 p.
- [2] Gripp J.A.B., Rade D.A. Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Vol. 112. – P. 359–383.
- [3] Nedin R.D., Dudarev V.V., Vatulyan A.O. Vibrations of inhomogeneous piezoelectric bodies in conditions of residual stress-strain state // Applied Mathematical Modelling. – 2018. – Vol. 63. – P. 219–242.
- [4] Kamenskikh A.O., Lekomtsev S.V., Senin A.N., Matveenko V.P. Free vibration of electroelastic thin-walled structures under static load // International Journal of Solids and Structures. – 2025. – Vol. 306. – 113123.

## ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В МИКРОКАНАЛАХ ПРОТОЧНОГО ТИПА В УСЛОВИЯХ НЕУСТОЙЧИВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ

Каракчеева М.И.<sup>1</sup>, Краснякова Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН  
karakcheeva.m@icmm.ru

Исследование посвящено изучению влияния неустойчивости Рэлея-Тейлора [1] на процесс смешения жидкостей в проточном микроканале. Экспериментальная установка включала горизонтальный микроканал с Y-образным микросмесителем, стенки которого изготовлены из прозрачного стекла, двухканальный шприцевый насос, камеру и источник рассеянного света. В качестве объекта исследования выбрана двухслойная система, состоящая из более плотного водного раствора перманганата калия, который подавался через одно плечо микросмесителя и менее плотной воды, которая подавалась через другое плечо.

В эксперименте рассмотрено две ситуации: жидкости изначально неустойчиво стратифицированы по плотности (случай конвективного смешения за счет развития неустойчивости Рэлея-Тейлора) и ситуация с устойчивой стратификацией (диффузионное смешение). Эксперименты выполнены для различных расходов и начальных перепадов плотности. Основным методом исследования являлся колориметрический анализ, с помощью которого восстанавливались двумерные поля концентраций раствора на основе экспериментально полученной концентрационной зависимости яркости цвета растворов. В ходе экспериментов изучалось влияние чисел Рейнольдса  $Re$  и Атвуда  $At$  на пространственную структуру течения и скорость перемешивания жидкостей.

С увеличением значения  $Re$  (при фиксированном значении  $At$ ), что соответствует росту скорости потока, наблюдалось снижение степени взаимного смешения исходных слоев. Это обусловлено тем, что возрастание скорости потока подавляет развитие конвективной составляющей неустойчивости Рэлея-Тейлора, поскольку сдвиговые силы начинают преобладать над силами плавучести [2]. В результате увеличивается характерная длина смешения, необходимая для установления однородного распределения концентрации.

При увеличении значения  $At$  (при фиксированном значении  $Re$ ), характеризующего перепад плотности между слоями, наблюдалось усиление интенсивности конвекции Рэлея-Тейлора. Показано, что формирующиеся конвективные плюмы ускоряют процесс перемешивания, что приводит к уменьшению длины смешения более чем на порядок по сравнению с диффузионным сценарием смешения.

Таким образом, результаты исследования продемонстрировали, что увеличение расхода и перепада плотности жидкостей значительно влияет на характер и эффективность процесса смешения. Баланс этих факторов определяет общий характер течения и эффективность смешения в подобных системах, что важно для оптимизации работы микросмесителей в различных приложениях

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (госзадание 121031700169-1)

### Литература

- [1] Kull H.J. Theory of the Rayleigh-Taylor instability // Physics Reports. 1991. 206. № 5. P. 197-325.
- [2] Cook A., Dimotakis P., Transition stages of Rayleigh–Taylor instability between miscible fluids // Journal of Fluid Mechanics. – 2020. – т. 443. – с. 69-99.



## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОЙ КАПЛИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, НАСЫЩЕННОЙ ДРУГОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Кирпичев В.А.<sup>1</sup>, Устюгов М.Д.<sup>1</sup>, Любимова Т.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пермский государственный университет, Пермь

<sup>2</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

[vadim.kirpichev1234@gmail.com](mailto:vadim.kirpichev1234@gmail.com)

Во многих технологических процессах, например, в нефтяной промышленности, встречается эффект, получивший название неустойчивости Саффмана-Тейлора [1]. Такая неустойчивость наблюдается, если менее вязкая жидкость вытесняет более вязкую; в этом случае образуются так называемые «вязкие пальцы», искажающие фронт вытеснения.

Настоящая работа посвящена численному моделированию формирования «вязких пальцев» при движении капли менее вязкой жидкости (воды) в более вязкой жидкости (глицерине) в поле тяжести в ячейке Хеле-Шоу. Расчеты проводились в пакете прикладных программ COMSOL Multiphysics. Задача решалась в двумерной постановке. Для описания динамики капли в пористой среде, в каждой из жидкостей использовались уравнение непрерывности и закон Дарси. Численное моделирование движения капли выполнялось в модуле Transport of Diluted Species in Porous Media.

Получены данные о формировании вязких пальцев на границе раздела при разных соотношениях плотностей и вязкостей жидкостей.



Рис. 1. – Формирование «вязких пальцев»; а – момент отрыва капли от капилляра, б – через 5 минут после отрыва.

Численные результаты сравнивались с имеющимися экспериментальными данными. Найдено хорошее согласие.

Исследования в этой области обладают высоким прикладным потенциалом и способствуют развитию технологий в химической, нефтяной и экологической сферах.

### Литература

[1] Бублик СА, Семин МА. Исследование неустойчивости Саффмана-Тейлора в нефтесодержащем пласте в двумерной постановке задачи. Математическое моделирование. 2020;32(7):127-42.

## ТРАНСПОРТ АКТИВНЫХ НАНОЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ МИКРОКАНАЛ ВО ВНЕШНЕМ ПОТОКЕ

Клименко Л.С.<sup>1</sup>, Марышев Б.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

lyudmilaklimenko@gmail.com, [bmaryshev@icmm.ru](mailto:bmaryshev@icmm.ru)

Исследуется транспорт суспензии активных наночастиц через микроканал. Концентрация частиц предполагается настолько малой, что взаимодействием между частицами в потоке можно пренебречь. Активная частица моделируется как самодвижущаяся частица, ее скорость определяется суммой скорости собственного движения и скорости, сообщаемой потоком и вычисленной в приближении Стокса. При воздействии теплового шума возникают флуктуации направления движения активной частицы. Исследована задача о закупорке канала при прокачке через него суспензии активных частиц во внешнем потоке. Задача решена для прямоугольного микроканала, в начальный момент времени реализуется течение Пуазейля. Поток жидкости создается за счет приложенного перепада давления между входом и выходом. Расположение частиц на входе в канал задается случайным образом по времени и пространству. Задача решена численно в рамках модели случайных блужданий. Если частицы приближаются к стенке на расстояние меньше своего размера, то происходит слипание под действием сил Ван-дер-Ваальса. Прилипание частиц к стенке приводит к изменению формы стенок микроканала, что в свою очередь изменяет структуру течения. Отрыв частиц обусловлен как вязкими напряжениями, возникающими со стороны потока, так и случайной силой, возникающей вследствие тепловых флуктуаций. Показано, что возможна реализация трех типов течения с закупоркой. Первый (I) – частицы не накапливаются на стенках канала, происходят редкие прилипания частиц к стенкам с последующим отрывом. Второй (II) – достигается некоторое равновесное состояние, когда в среднем количество частиц, осевших на стенку постоянно, количество отрывающихся в единицу времени частиц равно количеству осаждающихся. Третий (III) – полная закупорка канала, в этом режиме зазор канала исчезает, и поток через него прекращается. Первый режим наблюдается для малых концентраций или большой интенсивности теплового шума. Второй режим наблюдается лишь в некоторой области параметров, если говорить о критической объемной концентрации частиц в суспензии, подающейся на вход канала, то она должна варьироваться примерно в интервале 0.2 – 0.4 в зависимости от остальных параметров. Третий режим наблюдается при превышении предельной концентрации. При рассмотрении суспензии активных частиц было выявлено, что максимально медленно происходит закупорка при направлении скорости самодвижения частицы на выход из канала. При отклонении направления происходит резкая смена режима с первого типа на третий. В целом значение критического угла зависит от интенсивности теплового шума. При учете воздействия теплового шума на ориентацию направления самодвижения частицы, все зависит от параметра трения, отвечающего за сопротивление частицы к ее развороту. Несмотря на то, что увеличение теплового шума приводит не только к развороту частиц, но и к увеличению случайной силы, отвечающей за отрыв частиц, если параметр трения достаточно мал, то шум приводит к ускоренной закупорке канала. В результате, получена эволюция течения жидкости в микроканале при его закупорке. Проанализирована зависимость концентрации осевших частиц от времени, а также зависимость расхода через поперечное сечение микроканала от концентрации осевших частиц при различных начальных концентрациях, интенсивностях теплового шума, значениях скорости самодвижения активных частиц и значениях параметра трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 23-12-00180.

## ЧТО ДАЮТ ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОНВЕКЦИИ?

Клиорин Н.<sup>1,2,3</sup>, Степанов Р.А.<sup>2</sup>, Кузанын К.М.<sup>1,2</sup>, Васильев А.В.<sup>2</sup>, Сухановский А.Н.<sup>2</sup>, Рогачевский И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИЗМИРАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ИМСС УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>3</sup>Университет Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль  
[kuzanyan@gmail.com](mailto:kuzanyan@gmail.com), [rodion@icmm.ru](mailto:rodion@icmm.ru), [nat@bgu.ac.il](mailto:nat@bgu.ac.il)

Проведена серия модельных экспериментов по изучению свойств турбулентной конвекции в прямоугольной ячейке при числах Рэлея порядка  $10^8 - 10^9$  в воде с равномерно нагретой нижней твердой границей и открытой верхней поверхностью с квазистационарным тепловым потоком. Лабораторные измерения с использованием метода PIV (и стерео-PIV) позволяют исследовать длинные временные ряды для накопления статистических данных. Кроме того, численное моделирование дает трехмерные векторные поля скорости и температуры с высоким разрешением. Мы сравнили экспериментальные и численные результаты в перекрывающемся диапазоне параметров: лабораторные эксперименты с воздухом (Беер-Шева), водой (Пермь), численные эксперименты DNS и расчеты в рамках теории среднего поля. Продемонстрирована возможность формирования крупномасштабных долгоживущих конвективных ячеек при исчезающе малом турбулентном числе Рэлея, построенном на турбулентной теплопроводности и вязкости. При этом отношение горизонтального и вертикального масштабов в конвективной ячейке близко к 2. При увеличении горизонтального размера исследуемой области вдвое возникают две ячейки с тем же отношением масштабов, близким к 2. В значительной части вычислительного домена была обнаружена область устойчивой стратификации (положительный градиент температуры) за исключением приповерхностного и придонного слоев, что согласуется с расчетами в рамках теории среднего поля и лабораторными экспериментами с воздухом в Беер-Шеве.

Обнаружено, что в случае относительно малых чисел Рейнольдса почти всегда существуют медленные по сравнению с турбулентностью колебания, по-видимому связанные с устойчивой стратификацией в части исследуемой области. Этот эффект известен для атмосферной конвекции, но для астрофизических приложений он недостаточно исследован, поскольку теория длины пути перемешивания в принципе не может дать подобного градиента температуры из-за отсутствия в ней структур, отделенных от турбулентности.

Наши результаты имеет два важных следствия для физики Солнца. Одно касается обоснования метода построения крупномасштабной картины солнечной активности, связанной с солнечным циклом, из отдельных записей солнечных пятен и магнитограмм активных областей. Примером этого является известная диаграмма бабочек Маундера для солнечных пятен, формирующей крупномасштабную картину с типичным временем порядка периода солнечного цикла  $\sim 11$  лет и типичным пространственным масштабом солнечного полушария  $\sim 100$  Мм. В то же время пространственная протяженность отдельных солнечных пятен составляет порядка  $\sim 3-10$  Мм, а типичное время 2-20 дней. Перед использованием данных для построения диаграмм бабочек используются средние значения (скользящее среднее по солнечной широте и времени) в масштабах солнечных пятен или групп солнечных пятен. Затем данные сглаживаются по масштабу одного крыла бабочки.

Другое следствие - возможное сосуществование внутренних гравитационных волн с фоновой турбулентностью (грануляцией) в зоне солнечной конвекции с периодом, превышающим характерное время основной грануляции под поверхностью Солнца. Его проявление - это 3-5 минутные колебания на Солнце в области с субадиабатическим градиентом температуры по крайней мере в части солнечной конвективной зоны. (Грант РФФ 21-72-2006, 2021-2024)

## ГИБРИДНАЯ МКЭ/МСЧ СХЕМА ДЛЯ СКВОЗНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

Ключанцев В.С.<sup>1,2</sup>, Шутов А.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

<sup>2</sup>Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева, Новосибирск

[vskeyuchantsev@gmail.com](mailto:vskeyuchantsev@gmail.com), [alexey.v.shutov@gmail.com](mailto:alexey.v.shutov@gmail.com)

При решении начально-краевых задач применяются как сеточные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ), так и бессеточные подходы, такие как метод сглаженных частиц (МСЧ) [1]. В геометрически нелинейных постановках, при умеренных деформациях и незначительных искажениях сеток задачи решаются с помощью МКЭ с достаточной точностью. Однако при больших искажениях сеток точность конечно-элементной аппроксимации снижается и бессеточный МСЧ дает более корректные результаты в режиме больших деформаций.

В настоящей работе предлагается гибридный подход к моделированию деформирования твёрдых тел, который сочетает в себе МКЭ и МСЧ. Ключевое внимание уделено адаптивному, плавному, локальному переходу от описания континуума с помощью МКЭ к описанию с помощью МСЧ. В рамках гибридного подхода дискретизированный объём динамически переходит от элементов МКЭ к частицам МСЧ в областях больших деформаций. Этот приём позволяет более точно моделировать процессы локализации деформаций и разделения разрушенной конструкции на части. Наследование степеней свободы и алгоритм ассемблирования вектора внутренних сил построены таким образом, чтобы снизить объём вычислений за счёт унификации подхода. Разработанная гибридная схема сочетает преимущества обоих методов (МКЭ и МСЧ), одновременно нивелируя их недостатки.

В рамках гибридного подхода МКЭ/МСЧ реализованы геометрически нелинейные нелокальные модели накопления повреждений. Нелокальность описывается в рамках интегрального подхода [2,3,4], что позволяет предотвратить возникновение нефизичных решений, а также устраняет патологическую зависимость результатов от параметров дискретизации (ориентации и размеров конечных элементов и мелкости МСЧ дискретизации).

Для тестирования разработана иерархия тестовых задач. Проведены «патч-тесты» для гиперупругого материала, а также расчёты разрушения конструкции с V-образными вырезами из повреждаемого упругопластического материала. Представленные тесты демонстрируют основные преимущества гибридного подхода, а именно, высокую точность и устойчивость процедур при работе с неравномерными сетками и существенно неоднородным напряжённо деформированным состоянием.

Исследование проведено при поддержке РФФИ, код проекта 23-19-00514.

### Литература

- [1] Shutov A., Klyuchantsev V. On the application of SPH to solid mechanics //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – т. 1268. – №. 1. – с. 012077.
- [2] Bažant Z. P., Jirásek M. Nonlocal integral formulations of plasticity and damage: survey of progress //Journal of engineering mechanics. – 2002. – т. 128. – №. 11. – с. 1119-1149.
- [3] Shutov A. V., Klyuchantsev V. S. Large strain integral-based nonlocal simulation of ductile damage with application to mode-I fracture //International Journal of Plasticity. – 2021. – т. 144. – с. 103061.
- [4] Burago N.G., Nikitin I.Y.S., Nikitin A.D., Stratula B.A., Numerical modeling of fatigue fracture based on the nonlocal theory of cyclic damage //Mathematical Models and Computer Simulations. – 2024. – т.36, № 3 – с. 3-19.

## **ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПУАЗЕЙЛЯ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОСЕВЫХ ГРАДИЕНТОВ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ**

Князев Д.В.

*Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь*  
[dvk@icmm.ru](mailto:dvk@icmm.ru)

Исследование стационарного плоскопараллельного течения Пуазейля ньютоновской жидкости, индуцируемого продольными градиентами давления и температуры, с коэффициентом динамической вязкости, зависящим от температуры, сведено к отысканию решений трёхпараметрической краевой задачи для обыкновенного дифференциального уравнения третьего порядка. В области пространства параметров, соответствующей отрицательному осевому градиенту температуры, существуют две ветви решений, описывающих течения, сопровождающиеся отводом тепла от жидкости. Смыкаясь, ветви образуют границу в фазовом пространстве, за пределами которой решения задачи пуазейлевского типа не существуют. Одна из ветвей продолжима в область неотрицательных значений продольного градиента температуры и содержит изотермическое решение Пуазейля. Вдоль этой ветви кривая зависимости расхода от безразмерного осевого градиента температуры имеет минимум в области положительных значений последнего. В этой части пространства параметров режим теплообмена с внешней средой зависит от соотношения между всеми тремя безразмерными комплексами задачи. Режим теплообмена влияет на характер течения, тормозя поток у твёрдой стенки при теплоотдаче, и формируя более наполненный профиль скорости при поглощении тепла жидкостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 121031700169-1).

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ КЛЕТОК В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Князев Н.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[knyazev.n@icmm.ru](mailto:knyazev.n@icmm.ru), [nas@icmm.ru](mailto:nas@icmm.ru), [naimark@icmm.ru](mailto:naimark@icmm.ru)

Значительная часть важнейших клеточных процессов, в том числе ведущих к развитию патологических заболеваний, сопровождается изменением фенотипа клеток [1]. Подобные фенотипические изменения, обычно связанные со сменой морфологии и функциональных свойств клеток, происходят под влиянием внешних и внутренних стимулов биохимического и/или физического характера. Большой интерес представляет изучение реакции клеток на внешние механические воздействия при различных режимах нагружения, таких как циклическое сжатие и растяжение, сдвиговое нагружение и т.д. Исследование закономерностей отклика клеток на внешние механические стимулы позволяет моделировать сценарии внутриклеточного поведения и способствует установлению причин развития различных заболеваний.

Современные экспериментальные методы, такие как атомно-силовая микроскопия, количественная фазовая микроскопия и т.д., позволяют определять механические свойства клеток и отслеживать клеточную структуру на нанометровом и пиконьютоновском масштабах. Для прогнозирования механического поведения клеток при различных режимах нагружения разрабатываются и исследуются математические модели. При разработке математических моделей важно учитывать изменяющуюся внутреннюю структуру клеток, поскольку эволюция внутренней структуры напрямую влияет на их механическое поведение.

В настоящей работе проведено численное моделирование процесса мгновенного нагружения клетки с последующей выдержкой с использованием статистико-термодинамической модели [2], а также сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными количественной фазовой микроскопии клеток культуральной линии MCF-7 [3]. В основе предложенной модели лежит структурно-механическая модель, состоящая из двух упругих элементов, ответственных за упругое поведение микрофиламентов, промежуточных филаментов и микротрубочек, и одного ориентационного элемента, описывающего способность актиновых филаментов к упорядочиванию. Поскольку модель включает большое число параметров, отдельным этапом работы стала идентификация и верификация этих параметров на основе экспериментальных данных. Показано хорошее соответствие графиков численных решений с экспериментальными данными при различных значениях внешних сдвиговых напряжений в линейном и логарифмическом масштабе. Получены зависимости полных напряжений, деформаций и их составляющих от времени нагружения. Проанализированы профили объёмной плотности свободной энергии и величина потенциального барьера во время нагружения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-24-00165, <https://rscf.ru/project/24-24-00165/>.

### Литература

- [1] Zhao Y., et al. Cancer Metabolism: The Role of ROS in DNA Damage and Induction of Apoptosis in Cancer Cells // *Metabolites*. – 2023. – v. 13, № 796.
- [2] Nikitiuk A. S., Koshkina A. A., Bayandin Y. V., Naimark O. B. On thermodynamics and relaxation properties of eukaryotic cells // *Int. J. Non. Linear. Mech.* – 2023. – v. 157, 104532.
- [3] Eldridge W. J. Development of Optical Tools for the Assessment of Cellular Biomechanics.

## ДИСЛОКАЦИОННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КВАНТОВОМ КОЛЬЦЕ ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ковалев И.А.<sup>1</sup>, Колесникова А.Л.<sup>2,3</sup>, Гуткин М.Ю.<sup>1-3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

[i.kovalev2001@yandex.ru](mailto:i.kovalev2001@yandex.ru), [anna.kolesnikova.physics@gmail.com](mailto:anna.kolesnikova.physics@gmail.com), [m.y.gutkin@gmail.com](mailto:m.y.gutkin@gmail.com)

Элементной базой современных электронных и оптоэлектронных устройств служат плоские гетероструктуры с квантовыми кольцами (КК) различной формы, в частности, цилиндрическими [1]. Исследования устойчивости таких гетероструктур к образованию в них дислокаций и других дефектов, приводящих к деградации рабочих характеристик гетероструктуры в целом, чрезвычайно важны и актуальны.

Цель настоящей работы – расчет изменения энергии цилиндрического КК, погруженного в полупространство из другого материала, при образовании в нём призматической дислокационной петли (ПДП).

На рис. 1 показано упругое полупространство с полым цилиндрическим дилатационным включением [2], служащим моделью КК и имеющим ПДП.

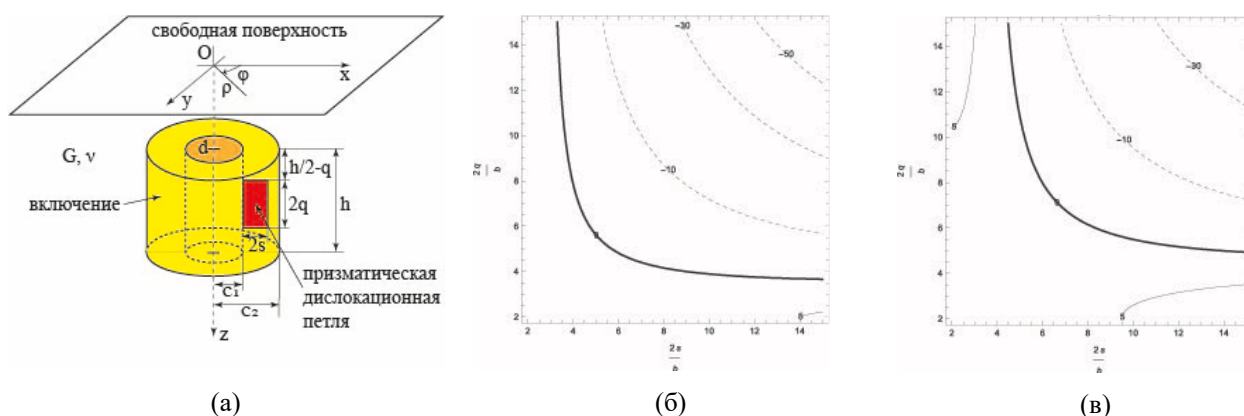


Рисунок 1. (а) – полое цилиндрическое включение в упругом полупространстве  $z > 0$ .

Показано изменение энергии при различных размерах прямоугольной ПДП: (б) – включение находится вдали от свободной поверхности; (в) – включение вблизи свободной поверхности.

Энергия выражена в единицах  $\frac{Gb^3}{2\pi(1-\nu)}$ , где  $G$  – модуль сдвига,  $b$  – величина вектора Бюргерса

ПДП. Расчёты проведены при коэффициенте Пуассона  $\nu = 0.3$  и параметре несоответствия кристаллических решёток включения и матрицы  $f = 0.039$ .

На основе поля напряжений цилиндрического КК в упругом полупространстве рассчитано взаимодействие КК с ПДП и показано, что при определённых размерах ПДП и КК возникает энергетическая возможность образования ПДП.

### Литература

[1] Сибирмовский Ю.Д. и др., ФТП 49(5), 2015. – сс. 652-657.

[2] Kolesnikova A.L., Gutkin M.Yu., Romanov A.E., Int. J. Solids Struct. 143, 2018. – pp. 59-72.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ**

Козлов В.Г., Полежаев Д.А.

*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*  
[kozlov@pspu.ru](mailto:kozlov@pspu.ru), [polezhaev@pspu.ru](mailto:polezhaev@pspu.ru)

Экспериментально изучается динамика двухфазной среды – жидкости и тяжелой сыпучей среды – в неравномерно вращающемся (либрирующем) горизонтальном цилиндрическом слое. В качестве сыпучей среды используются стеклянные шарики, в качестве жидкости – вода. В быстро вращающемся цилиндрическом слое под действием центробежной силы инерции стеклянные шарики образуют цилиндрический слой толщиной несколько диаметров около внешней границы слоя и вращаются вместе с жидкостью. Если скорость вращения изменяется с течением времени, то сыпучая среда продолжает двигаться вместе с цилиндрической стенкой, а маловязкая жидкость сохраняет состояние равномерного вращения во всем объеме за исключением вязких пограничных слоев около внутренней границы слоя и поверхности сыпучей среды. Относительно сыпучей среды жидкость совершает азимутальные колебания и вызывает ее оживление. Наблюдения показывают, что на границе двух сред, которую можно рассматривать как межфазную поверхность с нулевым поверхностным натяжением, образуется несколько видов структур. Особый интерес представляет осевая сегрегация – подвижные частицы образуют периодические вдоль оси вращения кольца, разделенные областями чистой жидкости. Проведено изучение кольцевых структур в зависимости от скорости вращения, амплитуды и частоты модуляций в цилиндрических слоях различной длины.

Оживленная сыпучая среда совершает колебания под действием гравитационной силы с частотой, равной скорости вращения цилиндра. Колебания тяжелой сплошной среды генерируют в цилиндрическом слое жидкости колебания, которые в резонансных условиях принимают вид инерционной волны (моды). Инерционная волна вращается со скоростью, равной и противоположной по направлению скорости вращения цилиндрического слоя жидкости. Одновременно волна создает периодическое вдоль оси вращения осредненное вихревое движение жидкости, которое переносит частицы сыпучей среды, образуя равноудаленные друг от друга области повышенной концентрации частиц. Результаты измерений пространственного периода кольцевых структур хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями о длине инерционной волны, возникающей в быстро вращающемся цилиндрическом слое маловязкой жидкости [1].

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 23-11-00242).

### Литература

[1] Borcia I. D., Harlander U. Inertial waves in a rotating annulus with inclined inner cylinder: comparing the spectrum of wave attractor frequency bands and the eigenspectrum in the limit of zero inclination //Theoretical and Computational Fluid Dynamics. – 2013. – т. 27. – с. 397-413.



## ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА, СОЗДАННОЕ ВРАЩАЮЩИМИСЯ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ, В Т-ОБРАЗНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ

Колесниченко И.В.<sup>1</sup>, Мамыкин А.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
[kiv@icmm.ru](mailto:kiv@icmm.ru)

В работе изучается течение жидкого металла в составной цилиндрической ячейке. Ячейка состоит из двух цилиндрических объемов одинаковой высоты. Диаметр верхнего объема больше, чем диаметр нижнего объема. В осевом сечении ячейка имеет Т-образную форму. В верхнем и нижнем объемах ячейки действует вращающееся магнитное поле, которое бесконтактно генерирует в жидком металле электромагнитные силы. Действие силы приводит к возникновению вращающегося течения. Меняя направление вращающегося магнитного поля и его величину как в верхнем, так и в нижнем объемах, можно изменять направление и интенсивность закрученного течения. Это приводит к генерации в объеме ячейки развитого турбулентного течения, особенно в случае разнонаправленного действия вращающихся магнитных полей [1].

Использование подобных перемешивающих течений открывает большие возможности для литейного производства [2]. Такое перемешивание также необходимо в развиваемых жидкометаллических накопителях энергии с локализованным подводом тока из-за того, что существует интервал значений внешнего магнитного поля, при воздействии которого интенсивность полоидального перемешивающего течения существенно снижается [3]. В данном случае решением проблемы может быть дополнительный канал с надетым на него индуктором вращающегося поля, генерирующим азимутальную силу.

Целью данного исследования является численное и экспериментальное изучение возникающих в объеме Т-образной ячейки течений и их особенностей при различных соотношениях интенсивности и направлений вращения магнитных полей. Математическая модель процессов основана на уравнениях магнитной гидродинамики в изотермическом случае и электродинамическом приближении, которое можно применять вследствие малости значений числа Гартмана и магнитного числа Рейнольдса. Численная реализация математической модели выполнена в программной среде Ansys. Исследования показали, что при вращающихся в разные стороны магнитных полях, в зависимости от соотношения их интенсивностей, во всем объеме ячейки доминирует либо верхний, либо нижний вихрь. Обнаружен узкий диапазон соотношений параметров вращающихся магнитных полей, при которых в объеме жидкого металла возникают конфигурации с одним, двумя или тремя мигрирующими вихрями.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

### Литература

- [1] Kolesnichenko I., Okatev R. Equalisation the toroidal and poloidal kinetic energies of liquid metal stirring flow // Eur. Phys. J. Plus. 2024. Vol. 139, P. 846.
- [2] Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I., Nikulin L. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible. Magnetohydrodynamics. 2014. Vol. 50, № 4. P. 407-422.
- [3] Frick P., Mandrykin S., Eltischev V., Kolesnichenko I. Electro-vortex flows in a cylindrical cell under axial magnetic field // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 949. P. 20.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Кондратьев Н.С., Д.С. Безверхий, М.Н. Балдин, А.Н. Подседерцев

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[kondratevns@gmail.com](mailto:kondratevns@gmail.com), [bezverkhyds@yandex.ru](mailto:bezverkhyds@yandex.ru), [matvej1999@gmail.com](mailto:matvej1999@gmail.com),  
[stevenmoore@yandex.ru](mailto:stevenmoore@yandex.ru)

Методы обработки поликристаллических материалов, особенно – труднодеформируемых сплавов, интенсивной пластической деформацией (штамповка, волочение, экструзия, ковка и др.) обычно реализуются при повышенных гомологических температурах. Актуальной проблемой является получение в процессе обработки заготовок конструкций и изделий с оптимальными механическими свойствами (прочностью, высоким пределом текучести, небольшим весом и пр.) [1]. Пластическое деформирование в этих процессах обычно сопровождается возникновением и эволюцией структурных несовершенств на различных структурно-масштабных уровнях [2]. Высокая температура при пластической деформации и/или последующий нагрев приводят к уменьшению количества и перераспределению дефектов, повышению однородности структуры материала. Это происходит вследствие реализации совокупности связанных высокотемпературных процессов – динамического возврата и динамической рекристаллизации [1].

В работе формулируется задача описания технологических процессов термомеханической обработки с целью получения функциональных (с априори заданными свойствами) поликристаллических материалов-изделий. Явным образом моделируется эволюция дефектной и зеренной структуры в результате реализации процесса неупругого деформирования с учетом рекристаллизации. Для решения сформулированной проблемы описания технологических способов обработки и получения функциональных (с априори заданными свойствами) поликристаллических материалов и изделий из них применяется аппарат многоуровневого моделирования с внутренними переменными, отражающими эволюцию структуры материала [3]. Предложена конститутивная модель материала для описания интенсивных пластических деформаций с учетом возврата и рекристаллизации, представлены результаты моделирования технологических процессов для ряда сплавов, включающие описание изменяющейся зеренной и дефектной структуры материала. Проведена апробация методики создания функциональных материалов-изделий с целью рационализации ее структуры для этих процессов.

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-2024-0002).

### Литература

- [1] Humphreys F.J., Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena – Elsevier, 2004. – 605.
- [2] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения, 2019. – 605 с.
- [4] Trusov P.V., Shveykin A.I., Kondratev N.S., Yants A.Yu. Multilevel models in physical mesomechanics of metals and alloys: results and prospects //Physical Mesomechanics. – 2021. – Vol. 24. – P. 391-417.

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА НА ФРОНТЕ ИСПАРЕНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ

Коновалов В.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[konovalov@icmm.ru](mailto:konovalov@icmm.ru)

При закалке металлов, когда холодная жидкость контактирует с раскаленным образцом, на поверхности последнего может образовываться паровая пленка, что значительно ухудшает теплоотдачу в жидкость. В земных условиях при наличии силы тяжести имеет место неустойчивость Релея-Тейлора слоя легкого пара, расположенного под объемом тяжелой жидкости. Неустойчивость должна разрушать паровую пленку, что желательно для технологических процессов. В тоже время этому может препятствовать парообразование. Так из сравнения скоростей развития возмущений и генерации пара определяется в рамках гидродинамической теории минимальный тепловой поток пленочного кипения [1].

Работа многих технологических устройств сопровождается вибрациями, которые могут значительно влиять на поведение многофазных сред. Вибрационное воздействие может применяться как простой способ управления гидродинамическими режимами. Так высокочастотные вибрации проявляют себя в виде средней вибрационной силы, которая может изменять форму межфазных поверхностей [2] либо влиять на движение включений, взвешенных в жидкости [3]. Эффект вибраций на второй кризис кипения исследован в [4].

Представлены результаты исследования в рамках потенциальной модели типа Лайзера [5] совместного влияния фазового перехода и высокочастотных вибраций на эволюцию локализованного и периодических возмущений на межфазной поверхности жидкость-пар. Описано основное состояние, когда жидкость отесняется от нагревателя слоем непрерывно образующегося пара. На этой движущейся межфазной поверхности развивается неустойчивость Релея-Тейлора, которая принимает форму проникающих в жидкость «пузырей» пара, скорости которых суммируются с общей скоростью границы раздела и стремятся к определенному в настоящем исследовании асимптотическому значению. Обнаружено, что развитие возмущений слабо зависит от их выбранного типа (локализованное либо периодические возмущения). Оказывается, что наличие высокочастотных вибраций имеет следствием то, что наиболее быстрорастущими на линейной стадии становятся длинноволновые возмущения, что также повышает асимптотическую скорость, характеризующую всплытие пузырей пара в жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121031700169-1).

### Литература

- [1] Lienhard J.H., Witte L.C. An Historical Review of the Hydrodynamic Theory of Boiling // *Reviews in Chemical Engineering*. – 1985. – Vol. 3. – I. 3–4. – P. 187–280.
- [2] Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Tcherepanov A.A., Roux B.H. Vibration influence on fluid interfaces // *Comptes Rendus. Mécanique*. – 2004. – Vol. 332. – I. 5–6. – P. 467–472.
- [3] Lyubimov D.V., Klimenko L.S., Lyubimova T.P., Filippov L.O.. The interaction of a rising bubble and a particle in oscillating fluid // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2016. – Vol. 807. – P. 205–220.
- [4] Коновалов В.В., Любимова Т.П., Любимов Д.В. Влияние нормальных вибраций плоского горизонтального нагревателя на второй кризис кипения // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2006. – Т. 47. – № 4. – С. 88–97.
- [5] Layzer D. On the instability of superposed fluids in a gravitational field // *Astrophys. J.* – 1955. – Vol. 122. – N. 1. – P. 1–12.

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ГЕОМЕТРИИ КАБЕЛЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ПЕРОКСИДНОЙ СШИВКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Корелин А.А.<sup>1</sup>, Труфанова Н.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[korelin-art@yandex.ru](mailto:korelin-art@yandex.ru), [ktei@pstu.ru](mailto:ktei@pstu.ru)

Выбор оптимальных значений технологических параметров при производстве кабелей из сшитого полиэтилена является весьма актуальным вопросом, в виду того, что существует ряд факторов, влияющих на качество получаемой изоляции. В данной работе приведены и оценены результаты реализации стационарной осесимметричной математической модели процесса тепломассопереноса и сшивки полимерной изоляции изолированной жилы в трубе вулканизации и трубе охлаждения с противотоком воды. Математическая модель тепломассопереноса реализована с помощью метода конечных элементов в прикладном пакете ANSYS. Оценка адекватности модели производится путем сравнения значений максимальной температуры, полученной численно с результатом натурального эксперимента, проведенного на действующем оборудовании одного из кабельных предприятий, отклонение полученных результатов не превышает 10 %. Для оценки качества изоляции приводятся результаты расчета степени сшивки, которые учитывают кинетические характеристики изоляционного материала, полученные экспериментальным путем [1, 2]. В работе, в зависимости от используемого сечения токопроводящей жилы, толщины изоляции, скорости работы линии и массового расхода охлаждающей жидкости получены поля температур, скоростей и степени сшивки во всем исследуемом объеме изоляционного слоя. Определены рациональные значения технологических параметров.

Проведение всестороннего анализа исследуемого процесса позволяет сделать вывод о том, что разработанная математическая модель с необходимой точностью описывает полученные результаты, которые могут найти применение при определении оптимальных технологических параметров на предприятии.

### Литература

- [1] Корелин, А.А. Анализ влияния кинетических и теплофизических характеристик полиэтилена при моделировании процесса пероксидной сшивки изоляции / А.А. Корелин, Н.М. Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 5–22. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.01.
- [2] Корелин А.А., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Численное исследование процесса сшивки полиэтилена в вулканизационной трубе в среде азота // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – №7. – С. 111-114.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧКИ ЛИНЗОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПРИ ХИМИЧЕСКОМ ТРАВЛЕНИИ

Корнилин Д.А., Пономарев Р.С., Демин В.А.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*  
[kornilin.daniil@mail.ru](mailto:kornilin.daniil@mail.ru), [demin@psu.ru](mailto:demin@psu.ru)

Среди различных методов получения линзованных оптических волокон, таких как, электродуговое оплавление, формирование клеевой линзы на торце волокна и других, особенно выделяется метод объемного химического травления. Он позволяет достигать более высокой повторяемости, а также более острого конца конуса преформы линзованного волокна [1-4]. Несмотря на это, возникает значительное количество проблем, связанных с зависимостью технологии от большого числа факторов: температуры раствора, концентрации травителя, а также толщины буферного слоя [5,6].

Целью данной работы является оценка влияния толщины буферного слоя на характеристики вытравленной области оболочки оптического волокна, находящейся в воздушной среде во время процесса травления. В качестве травителя использовался 40-процентный раствор плавиковой кислоты, а в роли буферного слоя выступал ксилол. Материалом для изготовления преформ являлось одномодовое оптическое волокно с диаметром оболочки 125 мкм, и сердцевины 9 мкм. Процесс травления протекал 1.5 ч при температуре 25 °С.

По результатам экспериментов можно говорить о влиянии величины буферного слоя на толщину оболочки оптического волокна в воздушной среде, оставшейся в процессе травления. Было установлено, что во время технологического процесса происходит вытравливание оболочки оптического волокна в воздушной среде, что носит, в целом, негативный характер и влияет на прочностные характеристики конечного продукта. Статистика экспериментов при указанных условиях дает оптимальное значение толщины буферного слоя 8 мм. Выявлено, что при дальнейшем увеличении толщины буферного слоя не наблюдается заметного сохранения толщины оболочки. Также эксперименты показали, что величина буферного слоя влияет не только на длину, но и выпуклость конуса, получающегося на конце оптического волокна в процессе травления.

### Литература

- [1] Asadollahbaik A. et al. Highly Efficient Dual-Fiber Optical Trapping with 3D Printed Diffractive Fresnel Lenses // ACS Photonics. 2020. Vol. 7, № 1. P. 88-97.
- [2] Blachowicz T., Ehrmann G., Ehrmann A. Optical elements from 3D printed polymers // e-Polymers. 2021. Vol. 21, № 1. P. 549-565.
- [3] Mononobe S., Ohtsu M. Fabrication of a pencil-shaped fiber probe for near-field optics by selective chemical etching // Journal of Lightwave Technology. 1996. Vol. 14, № 10. P. 2231-2235.
- [4] Wu C.-C. et al. Fabrication of aspherical lensed optical fibers with an electro-static pulling of SU-8 photoresist // Opt Express. 2011. Vol. 19, № 23. P. 22993-22998.
- [5] Корнилин Д.А., Пономарев Р.С., Демин В.А. Экспериментальное исследование влияния толщины буферного слоя на форму заготовок для линзованных оптических волокон // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Vol. 21, № 3. P. 396-403.
- [6] Корнилин Д. А., Пономарев Р. С., Демин В. А. Влияние толщины буферного слоя на форму линзованных оптических волокон // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2024. P. 435-436.

## КОНВЕКЦИЯ ФЕРРОЖИДКОСТИ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ КОНТУРЕ, ОСНАЩЁННОМ ТЕРМОМАГНИТНЫМ НАСОСОМ

Косков М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук»  
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского  
федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук,  
г. Пермь, Российская Федерация  
koskov.m@icmm.ru

Экспериментально исследован стационарный конвективный теплоперенос феррожидкостью в протяжённом замкнутом вертикальном гидродинамическом контуре. Конвекция обусловлена одновременным действием двух механизмов: термогравитационным, типичным для всех жидкостей [1] и термомагнитным, связанным с зависимостью намагниченности феррожидкости от температуры [2]. Термомагнитный механизм конвекции реализуется посредством термомагнитного насоса – короткого нагреваемого участка контура, на который накладывается неоднородное магнитное поле. В рамках исследования разработана методика получения информации о скорости течения жидкости в контуре, её объёмном расходе и величине теплопотока по результатам измерений температуры поверхности охлаждаемого участка контура. Получена информация о взаимосвязи интенсивности конвективного теплопереноса и объёмной концентрации магнитных наночастиц в феррожидкости. Показано, что умеренная концентрация является наилучшей с точки зрения конвективного переноса тепла. Произведена отладка термомагнитного насоса, направленная на поиск оптимального взаиморасположения источника магнитного поля и нагревателя. Установлено, что наибольшей производительностью обладает насос, у которого наиболее неоднородная часть магнитного поля накладывается на выходное сечение нагревателя. Проведены демонстрационные опыты, показывающие, что повышение эффективности термомагнитного насоса за счёт увеличения напряжённости поля неоправданно, ввиду появления в жидкости капельных агрегатов [3], накапливающихся в насосе и останавливающих его работу за счёт многократного локального увеличения вязкости. Результаты проведённых опытов находятся в согласии с результатами как теоретических, так и экспериментальных исследований, выполненных в последние десятилетия зарубежными авторами [4 - 6].

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Российской академии наук (рег. №: АААА-А20-120020690030-5).

### Литература

- [1] Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 392 с.
- [2] Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989.
- [3] Ivanov A.S. Temperature dependence of the magneto-controllable first-order phase transition in dilute magnetic fluids // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – Vol. 441, no. 10. – P. 620 – 627.
- [4] Alsaady M., Fu R., Li B., et al. Thermo-physical properties and thermos-magnetic convection of ferrofluid // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 88. – P. 14 – 21.
- [5] Aursand E., Gjennestad M.A., Lervåg K.Y. et al. Potential of enhancing a natural convection loop with a thermomagnetically pumped ferrofluid // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – Vol. 417. – P. 148 – 159.
- [6] Varma V.B., Cheekati S.K., Pattanaik M.S., et al. A magnetic nanofluid device for excellent cooling of light emitting diodes // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 7401 – 7419.

## ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ РЕЛАКСАЦИЮ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН В АЛЮМИНИИ

Красников В.С., Безбородова П.А., Майер А.Е.

Челябинский государственный университет, Челябинск  
[vas.krasnikov@gmail.com](mailto:vas.krasnikov@gmail.com)

Работа посвящена влиянию атомов водорода на механизмы пластической релаксации при сдвиговой деформации в алюминии. В работе [1] зафиксирована концентрация до 10% атомов водорода в слое 2 нм вблизи границ зерен (ГЗ), распределенного по близкому к нормальному закону. Проведено молекулярно-динамическое (МД) исследование влияния структуры и удельной энергии границ зерен на механизмы пластической деформации систем при сдвиговой деформации. МД расчеты выполняются с использованием пакета LAMMPS [2]. Для описания межатомных взаимодействий для системы алюминий-медь используется потенциал [3], для системы алюминий-водород из [4], взаимодействие атомов меди с водородом описывалось с помощью потенциала Леннарда Джонса, с константами, взятыми из работы [5]. Рассматривались системы, содержащие симметричные ГЗ наклона с различными углами разориентации с осью разориентации [100]: 8.79°, 10.38°, 22.62°, 36.87°. Были созданы системы с ГЗ наклона, содержащими медь в виде твердого раствора атомов замещения с атомными концентрациями от 2.5 до 10% и водород в виде твердого раствора межузельных атомов вблизи ГЗ с концентрацией 1, 2, 4, 6, 8, 10%, распределенными в слое толщиной 2 нм по нормальному закону. Проведенное исследование для систем, содержащих атомы водорода на ГЗ, показало, что наличие атомов водорода на ГЗ в рассмотренных концентрациях для большинства систем не меняло механизм пластической релаксации. Практически для всех рассмотренных систем наблюдалось водородное упрочнение вследствие закрепления границы атомами водорода и повышение напряжений в системе, для которых основным механизмом была миграция зерен. Для системы с углом разориентации 36.87° и удельной энергией ГЗ 694 мДж/м<sup>2</sup> при добавлении атомов водорода наблюдается повышение напряжения до 715 МПа, для этой системы без водорода максимальное напряжение 525 МПа. Разупрочнение при добавлении атомов водорода наблюдалась для системы 36.87° и удельной энергией ГЗ 467 мДж/м<sup>2</sup>, сдвиговые напряжения снизились с 1020 МПа для системы без водорода до 894 МПа для системы с 10% концентрацией атомов водорода вблизи ГЗ.

Для всех систем с медью наблюдался механизм проскальзывания по обеим ГЗ.

Работа поддержана грантом РФФИ № 24-11-20031.

### Литература

- [1] López Freixes M., Zhou X., Zhao H., Godin H., Peguet L., Warner T. Gault B. Nat. Commun. – 2022. - т. 13. - № 1. - с. 4290.
- [2] Plimpton S., Crozier P., Thompson A. SNL. - 2007. - т. 18. - с. 43.
- [3] Apostol F., Mishin Y. // Phys. Rev. B Condens. Matter. - 2011. - с. 83. - №. 5. - с. 054116.
- [4] Apostol F., Mishin Y. // Phys. Rev. B Condens. Matter. - 2010. - т. 82. - №. 14. - т. 144115.
- [5] Fatriansyah J. F. // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. - 2019. - т. 478. - №. 1. - с. 012034.

## УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ АЛЮМИНИИ С РАЗЛИЧНЫМИ ГРАНИЦАМИ ЗЕРЕН

Красников В.С., Манухина К.Д., Латыпов Ф.Т., Воронин Д.С., Безбородова П.А., Майер А.Е.

*Челябинский государственный университет, Челябинск*

[vas.krasnikov@gmail.com](mailto:vas.krasnikov@gmail.com)

Проведено атомистическое исследование влияния структуры и удельной энергии границ зерен (ГЗ) на механический отклик и упруго-пластическое поведение нанокристаллического алюминия. Рассмотрены ГЗ наклона и вращения с осью разориентации [100]: 1) наклона  $\Sigma 5a$  ( $8.79^\circ$ ),  $\Sigma 61a$  ( $10.38^\circ$ ),  $\Sigma 13a$  ( $22.62^\circ$ ) и  $\Sigma 5$  ( $36.87^\circ$ ); 2) вращения: ГЗ с углом разориентации  $4^\circ$ ,  $\Sigma 41a$  ( $12.68^\circ$ ),  $\Sigma 5$  ( $36.87^\circ$ ) и  $\Sigma 29a$  ( $43.61^\circ$ ) как для чистого алюминия, так и для систем с сегрегированной на границах медью с концентрациями от 1.25 до 15% ат.

Показано, что большеугловые ГЗ с различной удельной энергией демонстрируют значительный разброс критических напряжений активации пластичности, различающихся до 3 раз в случае границы наклона  $\Sigma 13a$ . В случае малоугловых ГЗ разброс результатов отсутствовал. Наименьшая величина напряжения активации пластической деформации для ГЗ наклона в чистом алюминии составила около 200 МПа для  $\Sigma 13a$ , наибольшая – 1800 МПа для  $\Sigma 61a$ . Для большеугловых ГЗ наклона преимущественный механизм при первоначальной активации пластичности – проскальзывание по ГЗ с вращением зерен, для малоугловых – миграция ГЗ. Переход от большеугловых к малоугловым сопровождается постепенным увеличением систем с различной удельной энергией, в которых наблюдается миграция ГЗ.

Для границ вращения наблюдалась аналогичная тенденция к понижению критического напряжения с ростом угла разориентации ГЗ. В целом большеугловые ГЗ вращения демонстрировали более низкие значения критических сдвиговых напряжений.

Полученные результаты для возможных значений критических напряжений в значительной мере отличаются от результатов, известных из работ других авторов и подчеркивают важность исследования поведения ГЗ с различной энергией.

Введение атомов меди в атомистические системы реализовано в слой толщиной 2 нм вблизи ГЗ в соответствии с нормальным распределением, что согласуется экспериментальными данными. Рассматривались концентрации меди от 1.25 до 15% ат. Введение меди приводило к существенному повышению критических напряжений в системах, при этом для 10% ат. Cu критические напряжения варьировались в диапазоне 1500 – 2400 МПа. Максимальный эффект упрочнения от введения атомов меди наблюдался для большеугловых границ вращения, где наблюдался рост критических напряжений от 500 до 1550 МПа.



## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ЭПИТЕЛИАЛЬНОЙ ТКАНИ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЦ

Красняков И.В., Бузмаков М.Д.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[krasnyakov\\_ivan@mail.ru](mailto:krasnyakov_ivan@mail.ru), [maxim.buzmakov97@gmail.com](mailto:maxim.buzmakov97@gmail.com)

Несмотря на значительный прогресс в методах живой микроскопии, лазерной абляции и атомно-силовой микроскопии [1, 2], многие аспекты процессов клеточной переупаковки при развитии эпителиальных тканей до сих пор остаются неясными, так как они сложны и многогранны. Переупаковка клеток может отличаться в зависимости от типа ткани, стадии развития или наличия патологий. Понимание этих контекстных различий требует более глубоких исследований.

Применение математических моделей и компьютерных симуляций к процессам клеточной переупаковки является мощным инструментом. Математические модели позволяют предсказать, как клетки будут вести себя в ответ на изменения внутренней или окружающей среды, или генетические мутации. При разработке математической модели развития эпителиальной ткани особое внимание стоит уделить структурной единице многоклеточной ткани, клетке, как элементу большой сложной системы. Модель должна включать в себя реальные процессы развития живой ткани, такие как деление и интеркаляция клеток, обмен химическими и механическими сигналами, а также клеточные процессы синтеза белков. Т.к. процесс деления клеток в нормальных эпителиальных тканях является симметричным, то и математическая модель должна учитывать этот аспект. А потенциал системы должен учитывать не только эластичность периметра и площади, а также и эластичность внутренних углов клетки, что позволяет получать более реалистичные конфигурации клеточных сеток развивающейся эпителиальной ткани [3].

В данной работе обсуждаются результаты исследований, полученные при помощи ранее разработанной нами математической модели морфогенеза эпителиальной ткани [3, 4]. А именно, подробно рассмотрен рост эпителиальной ткани: при одноосном растяжении, при различных граничных условиях (твёрдых, свободных и упругих границ). Также численно исследован процесс неравномерного деления клеток и их интеркаляции и изучено влияние такого поведения на энергетические конфигурации эпителия. Реализована модель неоднородного воздействия на развивающуюся эпителиальную многоклеточную ткань. Полученные результаты открывают новые перспективы для применения математических моделей в исследованиях механизмов морфогенеза и для прогнозирования поведения эпителиальных тканей в условиях изменяющейся среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-71-01020, <https://rscf.ru/project/23-71-01020/>

### Литература

- [1] Valon L., Marín-Llaurado A., Wyatt T. et al. Optogenetic control of cellular forces and mechanotransduction // Nature Communications. – 2017. – Vol. 8. – Art. 14396.
- [2] Devany J., Falk M.J., Holt L.J., Murugan A., Gardel M.L. Epithelial tissue confinement inhibits cell growth and leads to volume-reducing divisions // Developmental Cell. – 2023. – Vol. 58. – P. 1462-1476.
- [3] Krasnyakov I. Mathematical modeling of evolution of cell networks in epithelial tissues // Quantitative Biology. – 2024. – Vol. 12, Issue 3. – P. 286-300.
- [4] Krasnyakov I.V., Kostarev K.V., Bratsun D.A. Mathematical modeling of early processes of morphogenesis of epithelial tissues // Russian Journal of Biomechanics. – 2024. – Vol. 28, No. 1. – P. 76-86.

## ПРИМЕНЕНИЕ ШИАРЛЕТ–ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ МЕР «ЭНТРОПИЯ» И «СЛОЖНОСТЬ»

Красняков И.В.<sup>1</sup>, Краснякова Е.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

[krasnyakov\\_ivan@mail.ru](mailto:krasnyakov_ivan@mail.ru), [mosheva@icmm.ru](mailto:mosheva@icmm.ru)

Статистическая мера «энтропия» была предложена К. Шенноном в 1949 году [1]. Этот критерий измеряет степень неопределенности информационной системы. В силу схожести математического выражения вычисления информации с термодинамической энтропией, эту меру стали называть «энтропией Шеннона» или «статистическая энтропия». Вторая статистическая мера – «сложность». Эта мера впервые была введена в 1995 году [2]. Она включает в себя основные черты интуитивного представления об этой величине. Понятие «сложность» в физике начинается с рассмотрения идеального кристалла и изолированного идеального газа как примеров простых моделей и, следовательно, систем с нулевым значением меры «сложность».

В основном для расчёта этих мер используют так называемый перестановочный подход [3, 4]. В одной из недавних работ был предложен совершенно иной подход для расчёта этих характеристик, в основе которого лежит шиарлет–преобразование [5]. Шиарлет–преобразование является частным видом вейвлет–преобразования, которое позволяет учитывать анизотропные признаки системы. Такой подход позволяет получить локальные значения «энтропии» и «сложности» для исследуемой системы, в отличие от перестановочного подхода, который предоставляет возможность оценить лишь глобальные (средние) значения этих величин.

В данной работе, на основе предложенного алгоритма в работе [5], представлены результаты методического исследования пространственных структур с акцентом на их многомасштабность. Проанализированы: структура системы, которая осуществляет переход от кристаллического состояния к газообразному, структуры Бродатца, фрактальная структура с постепенным зашумлением, снимки структур поверхности планеты Марс и конвективные структуры в проточном микрореакторе Y-типа. Для последней системы продемонстрировано, что данная методика может служить инструментом для оценки степени смешивания двух жидкостей или интенсивности массопереноса [6].

Автор Красняков И.В. выражает искреннюю благодарность Фонду развития теоретической физики и математики «БАЗИС», грант #24-1-4-63-1.

### Литература

- [1] Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. – 1949. – Vol. 27. P. 379-423.
- [2] Lopez-Ruiz R., Mancin, Y.L., Calbet X. A statistical measure of complexity // Physics Letters A. – 1995. – Vol. 209. P. 321-326.
- [3] Bandt C., Pompe B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series // Physics Review Letters. – 2002. – Vol. 88. – Art. 174102.
- [4] Zunino L., Ribeiro H.V. Discriminating image textures with the multiscale two-dimensional complexity-entropy causality plane // Chaos, Solitons and Fractals. – 2016. – Vol. 91. – P. 679-688.
- [5] Brazhe A. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns // Physics Review E. – 2018. – Vol. 97. – Art. 061301.
- [6] Mosheva E., Krasnyakov I. Applying the shearlet-based complexity measure for analyzing mass transfer in continuous-flow microchannels // Fluid Dynamics & Materials Processing. – 2024. – Vol. 20, No. 8. – P. 1743-1758.

## **ГРАВИТАЦИОННО-НЕЗАВИСИМЫЕ РЕЛАКСАЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ЭФФЕКТОМ МАРАНГОНИ В МИКРОКАНАЛАХ**

Краснякова Е.А., Брацун Д.А., Сираев Р.Р., Шмыров А.В., Мизев А.И.

*Институт механики сплошных сред, Пермь*

[alex\\_misev@icmm.ru](mailto:alex_misev@icmm.ru)

Микрожидкостные проточные реакторы широко используются в микробиологии, тонком органическом синтезе, фармацевтике, биомедицине и т. д. Диффузионное перемешивание реагирующих растворов в каналах таких устройств, являющееся доминирующим в силу ламинарного режима течения, становится неэффективным, что требует включения дополнительных конвективных механизмов смешения. Пассивные методы, основанные на создании вихревых структур за счет сложной топологии канала, являются энергозатратными, так как требуют создания значительных градиентов давления вдоль канала. Более эффективными признаны активные методы интенсификации смешения, основанные на генерации течений во внешних полях (гравитационном, электромагнитном, акустическом и т.д.) при наличии градиентов свойств смешиваемых растворов (плотности, проводимости, диффузии и т.д.). В докладе предложен новый метод смешения для микроканалов, не требующий внешних полей и сложной топологии границ и основанный на использовании концентрационного эффекта Марангони. Для этого на некотором расстоянии от устья канала, где происходит контакт реагирующих сред, создается пузырек, частично перекрывающий поток. Если один из компонентов реакционной системы является поверхностно-активным веществом, на поверхности пузырька создается градиент поверхностного натяжения, что приводит к генерации концентрационно-капиллярного конвективного течения, интенсивно перемешивающего жидкости. Особенность обнаруженного конвективного движения в том, что оно развивается в форме релаксационных колебаний, когда за быстрой активной фазой, соответствующей возникновению интенсивной конвекции Марангони, быстро выравнивающей поле концентрации вблизи пузырька, следует относительно медленная фаза восстановления первоначального градиента концентрации основным потоком. Несмотря на то, что процесс протекает импульсно, за пузырьком образуется почти однородный раствор. В отличие от известных исследований таких колебательных систем обнаруженные релаксационные колебания не требуют гравитационного поля для реализации релаксационной фазы, что делает их потенциально интересными для использования в условиях микрогравитации. В докладе представлены результаты экспериментального и численного исследования пространственно-временных характеристик наблюдаемых конвективных режимов и эффективности работы микросмесителя в зависимости от управляющих параметров задачи: расхода жидкости, концентрации поверхностно-активного компонента, размеров и положения пузырька. Использование в экспериментах интерференционных методов исследования позволило не только визуализировать, но и количественно описать эволюцию пространственного распределения концентрации в канале. Вместе с тем, реализация прямого численного моделирования задачи позволила обнаружить и описать тонкую структуру полей скорости, недоступную экспериментальными методами, а также объяснить наблюдаемые в экспериментах особенности перехода системой между активной и релаксационной фазами. Сравнение результатов лабораторного и численного моделирования работы предложенного микросмесителя демонстрирует хорошее согласие, несмотря на ряд упрощений, сделанных при формулировке теоретической модели явления.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024 ).

## ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ КРИТИЧЕСКОЙ ДИСТАНЦИИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Кудряшев И.С., Изюмова А.Ю., Бартоломей М.Л., Плехов О.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[i.s.kudryashev@yandex.ru](mailto:i.s.kudryashev@yandex.ru), [fedorova@icmm.ru](mailto:fedorova@icmm.ru), [bartolomei.m@icmm.ru](mailto:bartolomei.m@icmm.ru), [poa@icmm.ru](mailto:poa@icmm.ru)

Во многих инженерных деталях и сборках используются различные скругления, вырезы, проточки, углубления и отверстия, которые негативно сказываются на усталостной прочности из-за концентрации напряжений. Такие методы, как дробеструйная обработка, пластическое выглаживание, термообработка, лазерная ударная обработка (ЛУО) и проч. позволяют сформировать в поверхностном слое детали поле остаточных напряжений, которое препятствует разрушению. Незаменимым инструментом для оценки напряженно-деформированного состояния деталей с наведенным полем остаточных напряжений и процесса их разрушения является численное моделирование.

Для анализа процесса разрушения важным является выбор критерия разрушения. В ряде отечественных работ [1-3] была показана необходимость введения структурного параметра, описывающего характерный линейный размер зоны процесса разрушения. Среди зарубежных ученых наиболее востребованным является подход [4], объединяющий интегральные критерии разрушения в так называемую теорию критических дистанций (ТКД). Подход позволяет спрогнозировать усталостную прочность образцов с концентраторами напряжений. В рамках ТКД учёт эффекта канавки осуществляется посредством эффективного напряжения, которое оценивается по распределению линейно-упругого поля напряжений на некотором расстоянии от границы концентратора. Целью данной работы была оценка величины критической дистанции в рамках метода конечных элементов на образцах с предварительно сформированным полем остаточных напряжений.

В рамках численного исследования рассмотрено три цилиндрических образца: без проточки, с проточкой с радиусом 1 мм и с проточкой с радиусом 0,1 мм. В одном варианте постановки задачи для образцов были подобраны такие усилия на растяжения, которые бы обеспечили пересечение кривых осевых напряжений, лежащих на отрезке от края проточки до центра образца и расположенных по нормали к оси цилиндра. В другом варианте постановки задачи данные образцы находились в начальном преднапряженном состоянии, которое было получено в результате решения численной задачи формирования поля остаточных напряжений, вызванных лазерным ударным воздействием, после чего аналогичным методом растянуты и подобраны усилия на растяжение. Точка пересечения кривых напряжений определяет зону критической дистанции. Обнаружено, что для образцов с ЛУО критическая дистанция увеличилась.

Работа выполнена за счёт средств гранта Российского научного фонда № 22-79-10168.

### Литература

- [1] Новожилов В.В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // Прикладная математика и механика. – 1969. – Т. 33. – Вып. 2. – С. 212-222.
- [2] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Об анализе откола с позиции структурной механики разрушения // ДАН СССР. – 1990. – Т. 313. – № 2. – С. 276-279.
- [3] Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6. – № 4. – С. 45-72.
- [4] Taylor D. The Theory of Critical Distances: A New Perspective in Fracture Mechanics. – Oxford: Elsevier Science, 2007. – 306 p.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВАРКИ СТАКАНА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ В МАЯТНИКОВОМ КОМПЕНСАЦИОННОМ АКСЕЛЕРОМЕТРЕ ТИПА Q-FLEX НА ЕГО ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ**

Кудряшев И.С., Шардаков И.Н.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[i.s.kudryashev@yandex.ru](mailto:i.s.kudryashev@yandex.ru), [shardakov@icmm.ru](mailto:shardakov@icmm.ru)

Акселерометры – приборы, которые являются крайне важными во всех отраслях жизни человека, технологическом прогрессе и развитии целого государства. Основное предназначение акселерометров заключается в использовании их в инерциальных навигационных системах, что позволяет, зная ускорения тела, определять его скорость и координаты, за счёт чего происходит его геопозиционирование.

Из-за обширности применения акселерометров и ограниченности возможностей корректировки с помощью внешних систем, особенно в сфере навигационных систем военного назначения, применяемых для наведения стратегических ракет дальнего действия, очень насущным является вопрос точности передаваемых ими данных [1]. Также устройство должно сохранять свои точностные характеристики на протяжении многих лет хранения при различных климатических условиях, а после и в тяжёлых условиях эксплуатации. Существуют различные причины возникновения погрешностей, но одна из главных – это температура. В докладе рассматривается возможность усовершенствования одного из узлов маятникового компенсационного акселерометра типа q-flex.

Целью данной работы является оценка, посредством численного моделирования, влияния замены клеевого соединения на сварное в месте крепления стакана в магнитной системе на работу акселерометра в рабочем температурном диапазоне прибора от минус 55°C до плюс 85°C.

В рамках работы были рассмотрены как существующая модель магнитной системы акселерометра с клеевыми соединениями, так и предлагаемая со сварными соединениями. В процессе моделирования определены и продемонстрированы нюансы процесса сварки и даны рекомендации для уменьшения деформаций, которые негативно сказываются на прецизионной поверхности корпуса магнитной системы, которая выполняет роль обкладки емкостного датчика перемещений. Проведено исследование прочностных характеристик сварных соединений. Показано, что в варианте с фиксацией магнитной системы в процессе сварки демонстрируется уменьшение деформации обкладки конденсатора, что улучшает точность прибора при сохранении его прочностных характеристик.

### Литература

[1] Коновалов С.Ф. Навигационные акселерометры. – М.: Издательство МГТУ. 2021. – 443 с.

## МОДЕЛЬ ИНТЕНСИВНОГО ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ РАСТВОРА СОЛИ

Кузнецова Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
julyas@icmm.ru

Процесс испарения капель водорастворимых солей лежит в основе различных технологических процессов, таких как опреснение воды, изготовление микро- и нанопорошков и т.д. Закономерности этого процесса зависят от многих факторов: исходного состояния и химического состава капли, ее температуры и размера, а также от влажности и температуры окружающей среды. Так, при относительной влажности воздуха близкой к нулю интенсивность испарения воды с поверхности капли превышает скорость диффузии соли к ее центру. В результате пересыщенный раствор сначала появляется в периферийной области капли, происходит нуклеация множества кристаллов на ее поверхности, которые в дальнейшем формируют жесткую кристаллическую корку вокруг капли раствора, см. рис. 1.

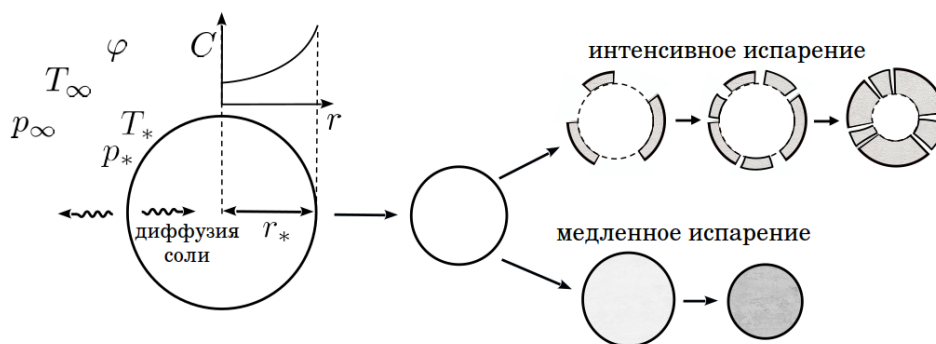


Рис. 1 Схема испарения капли раствора соли

В работе предложена новая модель, позволяющая описать кинетику интенсивного испарения капли раствора соли. За основу для новой модели взяты уравнения модели медленного испарения, которая описана в работе [1]. Дополнительно введено уравнение, описывающее эволюцию концентрации раствора соли в капле и слагаемые, учитывающие изменение скорости испарения за счет обдувания ее потоком воздуха. Благодаря введению предположения о форме профиля концентрации раствора, модель остается достаточно простой, что делает ее привлекательной для внедрения в численные расчеты динамики аэрозолей. Проведено сравнение предсказаний модели с экспериментальными данными по интенсивному испарению капли раствора хлорида натрия, которое показало хорошее качественное и количественное соответствие. В связи с отсутствием достаточной информации о зависимости скорости кристаллизации от концентрации раствора и внешних условий, данная модель содержит феноменологический параметр, который позволяет управлять скоростью формирования жесткой корки и тем самым добиться более качественного совпадения предсказаний модели с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 121031700169-1)

### Литература

[1] Кузнецова Ю.Л. Эволюция размера растворимой аэрозольной частицы во влажном воздухе // Вычислительная механика сплошных сред — 2022. т. 15, №1. – с. 31-44.

## БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОУПРУГОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПОЧЕК

Кузькин В.А.<sup>1,2</sup>, Трунова И.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург  
[kuzkina@gmail.com](mailto:kuzkina@gmail.com)

В работе рассматривается термоупругое поведение нелинейных цепочек при тепловом ударе (мгновенно создаваемом профиле начальной температуры). Исследуется режим, далее называемый баллистической термоупругостью, при котором макроскопические деформации малы, тепловое расширение линейно, преобразованием механической энергии в тепловую можно пренебречь, а теплопроводность близка к баллистической. Данный режим реализуется в нелинейных цепочках на малых временах. Аналитически решаются уравнения, описывающие баллистическую термоупругость цепочек в континуальном пределе. Рассматривается несколько конкретных профилей начальной температуры, для которых демонстрируются особенности и ограничения этих уравнений. Основной особенностью баллистической термоупругости является то, что распространение волн и баллистическая теплопроводность имеют одинаковый характерный временной масштаб. В результате, в частности, не выполняется квазистатическое приближение, обладающее достаточной точностью во многих задачах классической термоупругости, основанной на законе Фурье. Другой особенностью является баллистический резонанс (БР), т.е. возникновение механических колебаний с бесконечно растущей амплитудой в случае синусоидального профиля начальной температуры. На примере БР анализируется роль динамических слагаемых в уравнениях баллистической термоупругости. Обсуждается возможность наблюдения БР для начальных условий, соответствующих реальным экспериментам. Численно показано, что БР, ранее обнаруженный в цепочке  $\alpha$ -ФПУ, также присутствует в цепочках Леннарда-Джонса и Тоды. Чтобы продемонстрировать ограничения уравнений баллистической термоупругости, рассматриваются разрывные и кусочно-линейные профили температуры. Показано, в частности, что аналитические решения для деформаций, соответствующих разрывным начальным температурным профилям, имеют сингулярности. Обсуждаются возможности устранения данных сингулярностей. Полученные результаты могут использоваться для корректной постановки и интерпретации результатов экспериментов, направленных на исследование теплопроводности на наноуровне.

## МНОГОУРОВНЕВАЯ ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСЛОКАЦИЙ С ГРАНИЦАМИ ЗЕРЕН

Курмоярцева К.А.<sup>1</sup>, Трусов П.В.<sup>2</sup>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

[kurmoiartseva.k@mail.ru](mailto:kurmoiartseva.k@mail.ru), [trp@matmod.pstu.ac.ru](mailto:trp@matmod.pstu.ac.ru)

Границы зерен существенно влияют на пластическое деформирование поликристаллических материалов [1-3 и др.]. Вследствие различия ориентаций кристаллических решёток, границы зерен становятся препятствием для скольжения дислокаций, что приводит к образованию скоплений дислокаций и концентрации напряжений [2,4 и др.]. Подход на основе физических теорий пластичности обладает физической прозрачностью описания рассматриваемых процессов и универсальностью рассмотрения деформирования при разных условиях нагружения. В связи с этим предполагается расширить разрабатываемую на кафедре ММСП ПНИПУ дислокационно-ориентированную трехуровневую модель [5] подмоделью межкристаллитных потоков дислокаций.

Рассматривается представительный макрообъем поликристалла и выделяются два структурных мезоуровня, элементами которых являются кристаллиты (субзерна, фрагменты). На мезоуровне-1 описание производится в терминах континуальной механики (напряжений, деформаций, скоростей сдвигов). На мезоуровне-2 анализируется эволюция плотностей дислокаций на системах скольжения (СС) и скоростей их движения. Изменение плотностей дислокаций на СС реализуется за счет их генерации источниками Франка-Рида и аннигиляции на близких СС, а также потоков дислокаций через границы зерен и субзерен. Поток дислокаций определяется как произведение плотности дислокаций на среднюю скорость их движения (размерность  $[м^{-1}с^{-1}]$ ). Вычисление потоков дислокаций ведется только для активных СС, дислокации на которых движутся в сторону фасетки границы. Наиболее благоприятная для перехода СС соседнего кристаллита определяется с помощью условия минимальности несовместности скоростей сдвигов. При наличии разориентации кристаллических решеток соседних кристаллитов происходит образование остаточных дислокаций в фасетках границ зерен (субзерен), которые влияют на критические напряжения на СС обоих соседствующих кристаллитов.

Были проведены тестовые расчеты для бикристалла и рассмотрены различные варианты напряженно-деформированного состояния кристаллитов и ориентации фасетки границы. Получены результаты, качественно соответствующие данным, имеющимся в литературе.

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-2024-0002).

### Литература

- [1] Кайбышев О. А., Валиев Р. З. Границы зерен и свойства металлов. — М.: Металлургия, 1987. — 214 с.
- [2] Kacher J., Eftink B.P., Cui B., Robertson I.M. Dislocation interactions with grain boundaries // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2014. – Vol. 18, № 4. – P. 227–243.
- [3] Liu W. et al. Dislocation-grain boundary interaction in metallic materials: Competition between dislocation transmission and dislocation source activation / Liu W., Liu Y., Sui H., Chen L., Yu L., Yi X., Duan H. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2020. – Vol. 145. – P. 104158.
- [4] Bayerschen E., McBride A.T., Reddy B.D., Böhlke T. Review on slip transmission criteria in experiments and crystal plasticity models // Journal of Materials Science. – 2016. – Vol. 51, № 5. – P. 2243–2258.
- [5] Грибов Д.С., Трусов П.В. Дислокационно-ориентированная трехуровневая модель для описания деформирования поликристаллов: структура, алгоритм реализации, примеры применения для исследования сложного циклического нагружения // Физическая мезомеханика. – 2022. – Т.25, №4. – С.94-105.



## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Кустов Д.А.<sup>1,2</sup>, Никулин И.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия*

<sup>2</sup> *ПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия*  
[dakustov@pstu.ru](mailto:dakustov@pstu.ru), [illarion-nikulin@yandex.ru](mailto:illarion-nikulin@yandex.ru)

В процессе создания заготовок оптических волокон методом модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD) происходит реакция окисления посредством нагрева трубки кислородно-водородной горелкой. В этом случае теплообмен играет важную роль, так как он определяет распределение температуры в заготовке и, следовательно, влияет на эффективность процесса осаждения [1].

Математическое моделирование явлений, происходящих в процессе изготовления заготовок оптических волокон, позволит качественно и количественно представить взаимодействие сложных физических процессов. Это, в свою очередь, откроет новые возможности для оптимизации технологических параметров и улучшения характеристик конечного продукта.

Моделирование будет осуществляться с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics. Для того чтобы провести комплексное моделирование всех возможных процессов, сначала необходимо детально изучить каждый аспект в отдельности. В связи с чем, в работе рассматривается вопрос об адекватности модели расчета теплового излучения в программном пакете COMSOL Multiphysics. Проверка происходит путем сравнения результатов моделирования с аналитическим решением задачи теплообмена излучением между телами, произвольно расположенными в пространстве [2].

В данной задаче учитываются такие факторы, как температура окружающей среды и расстояние между телами, что позволяет более точно оценить влияние этих параметров на процесс. В результате проведенных вычислений была получена сходимость решений, что подтверждает корректность используемой модели и ее способность адекватно отражать реальные физические процессы. Также получены градиенты распределения температур в модели в зависимости от расстояния между телами.

### Литература

[1] Иванов Г.А., Первадчук В.П.. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учеб. пособие // Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 171 с.

[2] Цаплин. А.И. Теплофизика в металлургии: учеб. пособие // Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 200 с.

## **УСЛОВИЯ ПРИМЕНИМОСТИ СТРУКТУРНОГО ТЕНЗОРА ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЙ ПЛАНАРНЫХ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ**

Кучеровский А.С.<sup>1</sup>, Пантелеев И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

<sup>2</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия  
artemkc633@gmail.com, pia@icmm.ru*

Несмотря на широкое использование моделей деформирования твердых тел со скалярным параметром поврежденности, отражающим изменение площади поперечного сечения материала при росте микротрещин или деградацию его упругих модулей [1-2], многочисленные эксперименты указывают на тензорную природу явления разрушения. Для описания ориентационных эффектов развития поврежденности вводятся тензорные параметры второго или четвертого рангов [3-5].

Одной из центральных проблем использования тензорных моделей поврежденности для решения актуальных прикладных задач механики деформируемого твердого тела является задание компонент тензора поврежденности того иного ранга для исходного недеформированного состояния материала. Для лабораторного масштаба исходное дефектное состояние исследуемого материала может быть визуализировано/охарактеризовано с помощью методов микроскопии и рентгеновской компьютерной томографии (границы зерен, поры, микротрещины), для геологического масштаба – методами структурной геологии и полевой тектонофизики (разноранговые разрывы, сколовые трещины, зеркала скольжения). Для анализа полученных данных/изображений с целью восстановления компонент тензора поврежденности используются различные подходы тензорной алгебры и стереологии. Один из наиболее распространенных подходов базируется на понятии структурного тензора, описывающего распределение нормалей планарных дефектов (микротрещины, границы зерен) по ориентации на единичной окружности (2D-анализ) или единичной сфере (3D-анализ). При этом вопрос условий применимости данного формализма остается до сих пор открытым.

Настоящая работа посвящена разработке алгоритмов расчета структурного тензора второго и четвертого ранга для теоретических (синтетических) и наблюдаемых данных о распределениях микротрещин по ориентации, а также определению границ (условий) его применимости для описания этих распределений. Отдельное внимание уделено вопросу достаточности использования структурного тензора второго ранга для описания ансамблей микротрещин, имеющих больше одной преимущественной ориентации, а также минимального объема данных, являющегося репрезентативным, т.е. обеспечивающим неизменность параметров структурного тензора при увеличении размера выборки.

### **Литература**

- [1] Kachanov L.M. Effective elastic properties of cracked solids; critical review of some basic concepts // Appl. Mech. Rev. – 1992. – V.45. – p. 304-335.
- [2] Степанова Л.В., Игонин С.А. Параметр поврежденности Ю.Н. Работнова и описание длительного разрушения: результаты, современное состояние, приложение к механике трещин и перспективы// Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, № 2. – с. 133-145.
- [3] Krajcinovic D. Continuous damage mechanics revisited: basic concepts and definitions // J. Appl. Mech. – 1985. – V.52. – p. 829-834.
- [4] Lemaitre J., Desmorat R., Sauzay M. Anisotropic damage law of evolution // Eur. J. Mech. Solid. – 2000. – V.19. – p. 187-208.
- [5] Пантелеев И.А., Ляховский В.А. Ориентация трещиноватости в хрупком твердом теле при традиционном трехосном сжатии // Известия Российской Академии наук. Механика твердого тела. – 2022. – № 5. – с. 70-92.

## ТРЕХМЕРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ КАРТЫ В ИССЛЕДОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ В ПРИСУТСТВИИ ПАВ

Кучинский М.О.<sup>1</sup>, Любимова Т.П.<sup>1</sup>, Галишевский В. А.<sup>2</sup>, Рыбкин К. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

<sup>2</sup> *Пермский государственный университет, Пермь*

[kuchinskiy.m@icmm.ru](mailto:kuchinskiy.m@icmm.ru)

Исследование активности кавитационных событий в сонохимических реакторах играет ключевую роль во множестве технических приложений. Кавитация [1], возникающая при воздействии ультразвука на жидкость, представляет собой процесс образования и коллапса пузырьков, сопровождающийся формированием локальных зон экстремально высоких температур и давлений. Это может значительно ускорить химические реакции, очистить поверхности от загрязнений и повлиять на взаимодействие пузырьков с твердыми поверхностями [2]. Один из методов обнаружения и визуализации распределения кавитационной активности основан на фиксации зон эрозии с помощью алюминиевой фольги-теста (foil test) [3,4].

В докладе представляется модифицированный алгоритм для построения трехмерных тепловых карт распределения кавитационной активности. Обсуждаются результаты его применения для исследования кавитационной активности в растворах поверхностно-активного вещества SDS (додецилсульфата натрия), в концентрациях 1–3 ммоль/л в сонохимическом реакторе.

Добавление ПАВ в жидкость влияет на параметры кавитации, изменяя поверхностное натяжение и воздействуя на размер, количество и время жизни кавитационных пузырьков, что определяет эффективность сонохимических процессов. Например, при флотационном разделении минералов с применением ультразвука, кавитация может играть ключевую роль в улучшении взаимодействия частиц с пузырьками газа, а ПАВ усиливают этот эффект за счет модификации межфазных взаимодействий. Понимание влияния ПАВ на кавитационную активность не только помогает оптимизировать химические процессы, но и позволяет управлять эрозией внутри реакторов, что особенно важно для разработки энергоэффективных технологий. Исследования в этой области обладают высоким прикладным потенциалом и способствуют развитию технологий в химической, фармацевтической и экологической сферах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-11-00269).

### Литература

- [1] Я.Б.Зельдович К теории образования новой фазы. Кавитация. //ЖЭТФ – 1942. – Т. 12. – С. 525.
- [2] Lyubimova T. et al. 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.
- [3] Zhang X. et al. A feasibility study for noninvasive measurement of shear wave speed in live zebrafish //Ultrasonics. – 2020. – Т. 107. – С. 106170.
- [4] Yuan B., Jiang Y., Zhu L. Study on the processing methods of aluminum foil measurement signals for ultrasonic cleaning parameters //2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation. – IEEE, 2011. – С. 1180-1183.

## ПОСТАНОВКА В НАПРЯЖЕНИЯХ И РЕШЕНИЕ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Лалин В.В.<sup>1,2</sup>, Семенов Д.А.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва

<sup>3</sup>АО «Атомэнергoproject», Санкт-Петербург

[vlalin@yandex.ru](mailto:vlalin@yandex.ru), [dan290797@gmail.com](mailto:dan290797@gmail.com)

Исходной математической формулировкой плоской задачи линейной статической теории упругости при решении методом граничных элементов является постановка относительно перемещений в виде двух дифференциальных уравнений второго порядка с двумя неизвестными функциями – уравнений Ламе [1], граничные интегральные уравнения выводятся с помощью интегрального представления вектора перемещений (формула Соммильяны [2]). Так как результатом численного решения описанной выше задачи являются перемещения в узлах граничноэлементной «сетки», то определение напряжений сводится к численному дифференцированию поточечно заданной функции, что может привести к увеличению погрешности.

В настоящем докладе приводится дифференциальная постановка в напряжениях плоской задачи теории упругости для любых типов граничных условий, выводятся интегральное представление тензора напряжений и граничные интегральные уравнения в напряжениях. На примере задач для уравнений второго порядка (уравнений Лапласа, Пуассона) описываются основные идеи и способы вывода постановок [3, 4], применяемые к задачам теории упругости. Отмечается, что использование таких постановок позволяет в явном виде определять производную исходной функции (тензор напряжений, вектор теплового потока и т.д.) без операций численного дифференцирования.

На примерах показывается возможность использования описанных постановок для решения методом граничных элементов различных задач: стационарной теплопроводности [4], кручения стержней [3], статической теории упругости; внутренних и внешних краевых задач на полубесконечной области; смешанных краевых задач. Демонстрируется сравнение результатов численных расчетов с известными аналитическими решениями.

### Литература

[1] Лурье А.И. Теория упругости – М.: Наука, 1970. – 940 с.

[2] Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов – М.: Мир, 1987. – 524 с.

[3] Лалин В.В., Семенов Д.А., Задача о кручении: постановка в напряжениях и решение методом граничных элементов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2023. – т. 19. №4. – с. 339-348.

[4] Лалин В.В., Семенов Д.А., Граничные интегральные уравнения для вектора теплового потока и их решение методом граничных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2024. – №4. – с. 2-10.

## СВОЙСТВА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ, СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ДВОЙНЫМ СЛОЕМ С НЕИОНОГЕННЫМ ПАВОМ ТВИН20

Лебедев А.В.<sup>1</sup>, Лысенко С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Институт технической химии УрО РАН

*lav@icmm.ru*

После синтеза классических магнитных жидкостей [1, 2] была разработана стабилизация частиц в воде с помощью двойного слоя ПАВ [3, 4]. Нами предлагается для стабилизации частиц использовать двойной слой с неионогенным ПАВОм ТВИН20 (ПОЛИСОРБАТ 20). Предлагаемый способ стабилизации существенно расширяет перечень базовых сред.

Было синтезировано два образца магнитной жидкости со стабилизацией двойным слоем ПАВ в сочетаниях олеиновая кислота-ТВИН20 и декановая кислота-ТВИН20. У полученных образцов была измерена начальная статическая восприимчивость в зависимости от намагниченности насыщения. Полученные зависимости полностью идентичны результатам, полученным ранее для образцов, стабилизированных двойным слоем ПАВ с додецил сульфатом натрия во внешнем слое [5, 6]. То есть, начальная восприимчивость магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде, не зависимо от типа стабилизатора – ионогенный или неионогенный, может быть описана кубическим полиномом вида:  $\chi = \chi_L + \chi_L^2/3 - \chi_L^3/30$ , где  $\chi_L$  – восприимчивость Ланжевена (восприимчивость ансамбля невзаимодействующих, свободно флуктуирующих магнитных моментов).

Реологические свойства неионогенно стабилизированной магнитной жидкости радикально отличаются от свойств жидкости с диссоциируемым внешним стабилизатором. Ее относительная вязкость убывает с ростом температуры. То есть, вязкость магнитной жидкости со стабилизатором ТВИН20 уменьшается быстрее, чем вязкость базовой среды – воды.

На основе магнитных частиц, покрытых двойным слоем ПАВ с ТВИН20, возможен синтез магнитных жидкостей на основе новых базовых сред, использование которых ранее было невозможно. В частности, становится возможным создание низкотемпературных магнитных жидкостей на базе антифризов – водных растворов этиленгликоля или пропиленгликоля. Первые пробные опыты показали работоспособность таких жидкостей при температурах порядка  $-40^\circ\text{C}$ . Еще более привлекательно выглядит магнитная жидкость на основе водного раствора хлорида кальция. При концентрации раствора 30% его температура замерзания равна  $-51^\circ\text{C}$ . В первых опытах была достигнута нижняя рабочая температура  $-35^\circ\text{C}$ . В конце концов, в качестве базовой среды может быть использована даже стеклоомывающая жидкость для автомобилей – так называемая «незамерзайка».

### Литература

- [1] Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // УФН. - 1974. - Т. 112(3). - С.435 - 458.
- [2] Rosensweig R.E., Ferrohydrodynamics, Cambridge university press, Cambridge, 1985.
- [3] Shimoizaka J. Method of preparing a water-base magnetic fluid. Pat. 4094804 (USA), 1978.
- [4] Khalafalla S.E., Reimers G.W., Rholl S.A. Dilution stable water based magnetic fluids. Pat. 4208294 (USA), 1979
- [5] Лебедев А.В. Магнитная жидкость, стабилизированная двойным слоем ПАВ в воде, отвергает известные модели реологии и диполь-дипольного взаимодействия // Коллоидный Журнал. – 2024. – Т. 86. - № 4. – С. 458-468.
- [6] Лебедев А.В. Дипольное взаимодействие частиц в магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде // Вестник Юго-Западного университета. Серия техника и технологии. – 2024. - № 4. – (в печати).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В АТМОСФЕРЕ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ КАЛИЙНОГО РУДНИКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМА РАБОТЫ КОМБАЙНОВОГО КОМПЛЕКСА

Левин Л.Ю.<sup>1</sup>, Семин М.А.<sup>1</sup>, Лузин Р.Д.<sup>1,2</sup>, Суханов А.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Горный институт УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
[seminma@inbox.ru](mailto:seminma@inbox.ru)

Увеличение глубины ведения горных работ неизбежно приводит к повышению температуры в рабочей среде, что оказывает влияние на условия труда горнорабочих. Современные исследования показывают, что фактическая температура в рабочих зонах может достигать 39°C при максимально допустимом уровне в 26°C [1]. В связи с этим важной задачей становится разработка технических и организационных мероприятий, направленных на нормализацию микроклиматических условий. Одним из значительных источников тепловыделений в горных выработках является проходческо-очистной комбайновый комплекс, выполняющий разработку месторождения. Влияние тепловых потоков, создаваемых работающим комбайном, на характер массопереноса в тупиковой выработке уже было рассмотрено в нашей предыдущей работе [2]. Настоящее исследование является продолжением этой работы и направлено на изучение воздействия изменения режимов работы комбайнового комплекса на микроклимат тупиковой выработки.

На первом этапе исследования рассмотрено стационарное неизотермическое распределение воздушных потоков в тупиковой выработке для двух крайних случаев: наличие самоходного вагона рядом с работающим комбайном и его отсутствие в выработке. Во втором случае комбайн остановлен. Анализ изменения закономерностей тепломассопереноса в зависимости от расположения вагона проводился для двух способов проветривания: нагнетательного и всасывающего. Всасывающий способ выбран из-за своей высокой эффективности в нормализации пылевой обстановки в тупиковой выработке [3].

Для решения задачи использовалась система усреднённых уравнений Навье-Стокса с турбулентностной моделью Realizable k-epsilon. Модель была параметризована и валидирована на основе экспериментальных данных. Результаты моделирования показали значительные изменения в распределении температуры при смене режима работы комбайнового комплекса. Особенно выраженные изменения наблюдаются при всасывающем способе проветривания – температура воздуха около кабины машиниста комбайна изменяется на 2,5°C.

Выявлено, что при всасывающем способе проветривания тёплый воздух скапливается под кровлей выработки, чего не происходит при нагнетательном способе. Этот процесс объясняется различиями в структуре воздушных потоков, создаваемых этими способами проветривания. При всасывающем способе скорость воздушных потоков значительно ниже, что способствует разделению слоев по температуре вдоль высоты выработки.

### Литература

- [1] Isaevich A., Semin M., Levin L., Ivantsov A., Lyubimova T. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes // Sustainability. – 2022. – Т. 14, № 5. – Статья № 3030.
- [2] Semin M., Ivantsov A., Lyubimova T., Isaevich A., Sukhanov A. Analyzing the impact of heat emissions from the borer miner on the efficiency of the exhaust ventilation system in a blind heading // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Т. 235. – Статья № 126183.
- [3] Исаевич А.Г. Научное обоснование методологии управления пылевой обстановкой в горных выработках калийных рудников: дисс. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2023. – 266 с.

## ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГОРОДСКОГО РЕЛЬЕФА НА ЦИРКУЛЯЦИЮ В НИЖНЕМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Легенький Н.М.<sup>1</sup>, Беляева А.В.<sup>2</sup>, Попова Е.Н.<sup>2</sup>, Сухановский А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный университет, Пермь

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

В настоящее время процесс урбанизации приобрел глобальный характер. Уплотнение городской застройки и увеличение высоты зданий оказывает существенное влияние на микроклимат внутри городской среды. Сложная геометрия зданий изменяет ветровые потоки, оказывая влияние на распределение температуры и концентрации вредных примесей. Прямое численное моделирование и натурные измерения циркуляции в нижнем слое атмосферы в области крупного города, которая определяет теплообмен и перенос примесей, требуют больших вычислительных и материальных ресурсов. Альтернативным подходом является лабораторное моделирование при помощи макетов городов, которое, несмотря на ряд ограничений, дает полезную информацию о влиянии городского рельефа и застройки на процессы в нижнем слое атмосферы [1-3]. В работах [1-3] рассматривалось состояние атмосферы без внешней циркуляции (штиль), которая может играть определяющую роль при переносе примесей и тепла. В данной работе предлагается моделировать внешнюю атмосферную циркуляцию при помощи крупномасштабного конвективного течения от горизонтального, локализованного, вытянутого в одном из направлений нагревателя. Одним из достоинств предлагаемого способа моделирования атмосферной циркуляции, является устойчивая стратификация течения. Реализованы серии полевых измерений скорости в случае плоского рельефа и с использованием макета г. Перми. Проведен анализ структуры течения и его средних и пульсационных характеристик.

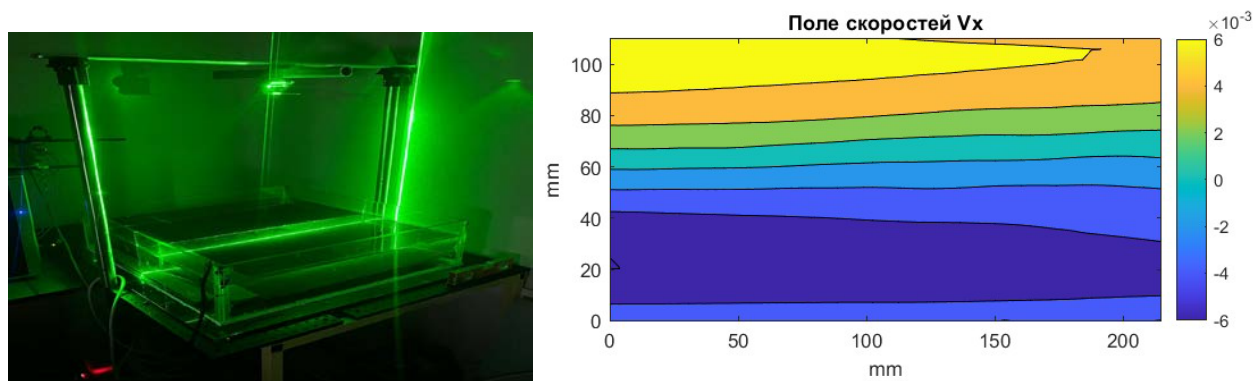


Рис.1. Экспериментальная установка и пример распределения горизонтальной компоненты скорости в случае плоского дна.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012300246-9)

### Литература

- [1] Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area //Urban Climate, – 2022. – V. 43, P.101177
- [2] Евграфова, А., Сухановский, А. Конвективный перенос условной примеси в пределах городской геометрии // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. No 2. С.14–21.
- [3] Беляева А. В., Сухановский А. Н. Лабораторное моделирование в задачах промышленной безопасности // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. No 4. С.14–21.

## ОБЩАЯ СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТИФИКАЦИИ ВОДНЫХ МАСС В ЗОНАХ ПЕРЕМЕННОГО ПОДПОРА НА КАМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В РАЙОНЕ Г. БЕРЕЗНИКИ

Лепихин А.П.<sup>1</sup>, Любимова Т.П.<sup>2</sup>, Богомолов А.В.<sup>1</sup>, Опутин М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Горный институт УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

[lepin49@mail.ru](mailto:lepin49@mail.ru), [lubimova@icmm.ru](mailto:lubimova@icmm.ru)

Характерной особенностью стратифицированных водных объектов является наличие в них плотностных градиентов. Вертикальные градиенты плотности воды формируют стратификацию водных масс по глубине водотока при числе Ричардсона  $Ri = (g / \rho)(\partial \rho / \partial z)(\partial V / \partial z)^{-2} \geq 1$  или плотностном числе Фруда  $Fr_\rho = V(g h \Delta \rho / \rho)^{-1/2} < 1$ .

Наряду с вертикальными градиентами, приводящими к плотностной слоистости водных масс, могут формироваться и горизонтальные градиенты, ответственные за образование вертикальных барьеров в водотоках. Впервые они были обнаружены в устьях приливных рек. Если придонный слой воды характеризуется как значительной вертикальной, так и горизонтальной неоднородностью водных масс, тогда при  $-h_{\text{ск}}(\partial \rho / \partial x) / \rho \geq i_0$ , где  $h_{\text{ск}}$  – толщина нижней придонной области потока;  $i_0$  – гидравлический уклон потока, то в нижней придонной области будет наблюдаться не только замедление течения до полной остановки, но даже изменение направления течения.

Высота расположения слоя стратификации, исходя из элементарных балансовых соотношений, должна располагаться при  $h_{\text{ск}} \sim V^2 / [g(\Delta \rho z / \rho)]$ , где  $V \sim C(H i)$ . Совершенно очевидно, что при достаточно больших скоростях потока  $V$  стратификация отсутствует и  $h_{\text{ск}} \rightarrow H$ , т. е. водные массы однородны.

Внутри слоя плотностной стратификации, как уже отмечалось, должна изменяться и скорость потока, в простейшей «0» мерной постановке скорость течения должна быть  $V \sim C[h_{\text{ст}}(i_0 - i_{\text{ст}})]^{1/2}$ , т.е. в придонной области скорость течения может падать до 0, что приводит к росту минерализации воды до  $S \rightarrow S$  фил.

Генезис формирования стратифицированных структур в Камском водохранилище в районе г. Березники, по-видимому, связан с фильтрационными разгрузками высокоминерализованных рассолов. Если суммарная интенсивность разгружаемых рассолов составляет  $q$ , кг/с, при расходе воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/с при полном перемешивании минерализация воды в потоке должна увеличиваться на  $\Delta S \sim q / Q$ , г/л. Однако в наблюдаемом водотоке не наблюдается полное перемешивание, поэтому для оценки локальных значений  $\Delta S$  необходимо рассматривать не общий расход воды по р. Каме, а его локальные эффективные значения, которые в свою очередь формируются под влиянием данных разгрузок. Нетрудно видеть, что при расходе фильтрационного потока  $q \sim 30$  кг/с и эффективном расходе воды р. Камы  $Q \sim 300$  м<sup>3</sup>/с имеем  $\Delta S \sim 0.1$  г/л, что соответствует наблюдаемым значениям.

Таким образом, материалы регулярных наблюдений хорошо соответствуют предлагаемому механизму формирования вертикальных колебаний минерализации воды в р. Камы (Камском водохранилище) в теплый период в районе Соликамско-Березниковского промузла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края (грант С-26/828).



## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA

Лесникова Ю.И., Каменских А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[ulesig@gmail.com](mailto:ulesig@gmail.com), [anna\\_kamenskih@mail.ru](mailto:anna_kamenskih@mail.ru)

Оптические волокна широко используются в науке и технике [1]. Их оптические характеристики зависят от напряженно-деформированного состояния (НДС) светопроводящей жилы и поведения полимерных материалов защитного покрытия. В работе проведено исследование оптического волокна типа Panda в рамках заданного цикла изменения температуры от +60 °С до –60 °С. Рассмотрено два варианта моделирования коэффициентов температурного расширения (КТР) материалов защитно-упрочняющего покрытия (ЗУП): постоянная величина и зависимость от температуры. Оптическое волокно свободно от статических нагрузок и кинетических условий, на модели действует только температура окружающей среды. Также в данном исследовании рассмотрен вопрос о влиянии характера сопряжения между стеклянной заготовкой волокна типа Panda с полимерным покрытием: поверхность сопряжения заготовка-полимер и между слоями полимерного покрытия (двухслойная конфигурация). Рассмотрено три варианта характера сопряжения: идеальный контакт, полная адгезия и фрикционный контакт с постоянным коэффициентом трения. Исследование проводилось при стандартном соотношении толщин слоев защитных покрытий в двухслойной конфигурации: внутренний слой ЗУП из полимерного материала DeSolite 3471-1-152A; внешний слой ЗУП из полимерного материала DeSolite DS-2015 ( $r_v = 40$  мкм,  $r_{\text{ЗУП}_1} = 65$  мкм,  $r_{\text{ЗУП}_2} = 83,5$  мкм). Для случая однослойного ЗУП:  $r_v = 40$  мкм, толщина покрытия  $r_{\text{ЗУП}} = 83,5$  мкм, материал DeSolite DS-2015. Материалы ЗУП моделировались в рамках вязкоупругости на основе экспериментальных данных [2]. Стеклянные элементы моделируются в рамках теории упругости с учетом фиктивной температуры начала остывания заготовки 1600 °С [3].

Установлено, что отрицательная температура оказывает существенное влияние на НДС: внутренний слой покрытия начинает сдавливать кварцевое основание, а также влияет на внешний слой покрытия и зону сопряжения полимер-полимер. Данный эффект может оказывать негативное влияние на деформационные и оптические характеристики системы. При однослойной геометрии покрытия негативных эффектов не наблюдается. Рабочие характеристики волокна при реализации идеального контакта и полной адгезии на границах сопряжения элементов не обладают отличиями при термическом деформировании системы. При нагревании волокна происходит снижение модового двулучепреломления, а при охлаждении наоборот повышение. Характер сопряжения и форма учета КТР не оказывает влияния на оптические характеристики волокна в условиях свободного расширения-сжатия. При отрицательных температурах для случая двухслойного ЗУП (фрикционный контакт) наблюдаются сильные отличия НДС моделей при постоянном и зависящим от времени КТР.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0007).

### Литература

- [1] Мендес А. Справочник по специализированным оптическим волокнам: пер. с англ. / А. Мендес, Т. Ф. Морзе. – М.: Техносфера, 2012. – 728 с.
- [2] Shardakov I.N., Trufanov A.N. Identification of the Temperature Dependence of the Thermal Expansion Coefficient of Polymers // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – Art. 3035. <https://doi.org/10.3390/polym13183035>
- [3] Kamenskikh A.A., Sakhabutdinova L., Strazhec Y.A., Bogdanova A.P. Assessment of the Influence of Protective Polymer Coating on Panda Fiber Performance Based on the Results of Multivariant Numerical Simulation // Polymers. – 2023. – Vol. 15. – Art. 4610. <https://doi.org/10.3390/polym15234610>

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПЫТАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Лукашов Р.В.<sup>1</sup>, Антонов С.Д.<sup>1</sup>, Волков Г.А.<sup>1,2</sup>, Остропико Е.С.<sup>1</sup>, Груздков А.А.<sup>1</sup>,  
Петров Ю.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

[rodion.lukashov@spbu.ru](mailto:rodion.lukashov@spbu.ru), [st095227@student.spbu.ru](mailto:st095227@student.spbu.ru), [g.volkov@spbu.ru](mailto:g.volkov@spbu.ru), [e.ostropiko@spbu.ru](mailto:e.ostropiko@spbu.ru),  
[gruzdkov@mail.ru](mailto:gruzdkov@mail.ru), [y.v.petrov@spbu.ru](mailto:y.v.petrov@spbu.ru)

Одним из простейших способов тестирования материалов высокоскоростными нагрузками является метод прямого удара цилиндрического образца о жесткую преграду (метод Тейлора) [1]. Во время испытания достаточно зафиксировать только скорость соударения образца с преградой. Помимо этого проводится прямое измерение длины образца и диаметра контактного сечения до и после взаимодействия с преградой, а также длины той части образца, что во время удара деформировалась упруго.

Обработка получаемых результатов по классической методике, предложенной Тейлором [2], позволяет оценить только величину так называемого динамического предела текучести. Однако, многие эксперименты показывают, что эта величина не является постоянной и существенно зависит от скорости нагружения. В свою очередь в этом тесте количественно оценить этот параметр не представляется возможным. В связи со сложностью анализа процесса пластического деформирования во время соударения некоторые исследователи модифицируют экспериментальную схему современными системами регистрации механических характеристик [3,4]. Цель этой работы заключалась в создании модифицированной методики обработки результатов измерений оригинальной схемы испытаний, которая позволит вычислить значения прочностных параметров, определяющих скоростную зависимость предела текучести материала.

На основе критерия инкубационного времени была разработана новая методика обработки данных испытаний по схеме Тейлора. Показано, что результаты, полученные в рамках предлагаемого метода, позволяют обнаружить характеристики материала, которые должны определять его прочностные свойства при произвольном высокоскоростном динамическом нагружении.

Для отработки данной методики были проведены несколько серий испытаний образцов из меди М1 различной длины. Затем были проведены тесты новых перспективных материалов, таких как ультрамелкозернистый титан и высокопрочный магниевый сплав.

### Литература

[1] Taylor G.I., James Forrest lecture 1946. The testing of materials at high rates of loading // Journal of the Institution of Civil Engineers. – 1946. – т. 26, №. 8. – с. 486-519.

[2] Taylor G.I., The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress I. Theoretical considerations // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1948. – т. 194. – с. 289-299.

[3] Eakins D.E., Thadhani N.N., Instrumented Taylor anvil-on-rod impact tests for validating applicability of standard strength models to transient deformation states // Journal of Applied Physics. – 2006. – т. 100, №. 7. – с. 073503

[4] Gao C., Iwamoto T., Tanaka Y., Kusaka T., Numerical and experimental studies on specimens with integrated pulse-shaper used for the instrumented Taylor impact test to measure stress-strain curves at high rates of strain // International Journal of Impact Engineering. – 2023. – т. 179. – с. 104644.

## **ВЛИЯНИЕ МОДЕЛЕЙ КРОВИ НА ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ В СОСУДАХ ВИЛЛИЗИЕВА КРУГА С АНЕВРИЗМАМИ**

Любимова А.А., Кучумов А.Г.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[sashal05@mail.ru](mailto:sashal05@mail.ru), [kuchymov@inbox.ru](mailto:kuchymov@inbox.ru)

Аневризма – это выпячивание стенки кровеносного сосуда, возникающее в месте ее истончения. В последствии стенка сосуда в истонченной области ослабляется, появляется риск разрыва аневризмы, что влечет за собой обильное внутренне кровоизлияние. Аневризмы сосудов головного мозга (Виллизиева круга) считаются особенно опасными из-за своего местоположения, ограниченного черепной коробкой и близким расположением головного мозга. Численное исследование с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD) может помочь в прогнозировании оценки риска разрыва аневризмы [1, 2].

Рассматривались пять моделей сосудов Виллизиева круга с аневризмами. Кровь рассматривалась как ньютоновская и как неньютоновская жидкость с зависящей от времени вязкостью (модель Каро-Ясуда). Решалась нестационарная задача течения. На границах артерий, через которые кровь попадает в сосуды, задавался расход, зависящий от времени; на границах, через которые кровь выходит из сосудов, задавалось постоянное давление. Были проанализированы поля распределения скоростей, давления и пристеночных касательных напряжений.

Результаты сравнения моделей показали, что значения скоростей, давления и пристеночных касательных напряжений в среднем остаются близкими для всех пяти моделей, но характер течения при рассмотрении разных моделей крови различается. Наибольшие отличия наблюдаются в моделях с аневризмой, расположенной на передней соединительной артерии (случай 1), а также в области разветвления правой задней соединительной артерии и правой внутренней сонной артерии (случай 2). Максимальные значения скоростей отличаются на 6,02% в случае 1 и на 7,23% в случае 2, значения давлений соответственно отличаются на 1,78% и 10,89%, значения пристеночных касательных напряжения отличаются на 4,62% и на 52,86% соответственно. Также отмечено, что при рассмотрении крови как ньютоновской жидкости время численного расчета меньше.

### Литература

- [1] Доль А. В. Биомеханика артерий шеи и головы: развитие аневризм и отрыв атеросклеротических бляшек при сочетанных патологиях // Российский журнал биомеханики. – 2024. – т. 28, № 3. – с. 25–38.
- [2] Тазюков Ф. Х., Кутузова Э. Р., Снигерев Б. А., Гарифуллин Ф. А. Течение крови в кровеносных сосудах с аневризмой // Российский журнал биомеханики. – 2018. – т. 22, № 3. – с. 345–360.

## СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ ОКОЛО ТВЕРДОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В НАСЫЩЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ НАГРЕВЕ СВЕРХУ

Любимова Т.П.<sup>1</sup>, Любимов Д.В.<sup>2</sup>, Садилов Е.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
[lubimova@icmm.ru](mailto:lubimova@icmm.ru)

На примере задачи о свободной тепловой конвекции около твердого включения в насыщенной жидкостью пористой среде, нагреваемой сверху, изучается формирование течений в устойчиво стратифицированной жидкости при слабом нарушении устойчивой стратификации. Простая форма уравнений тепловой конвекции в пористой среде в приближении Дарси-Буссинеска позволяет провести достаточно полное аналитическое исследование проблемы. Уравнения, записанные в терминах функции тока и отклонений температуры от линейного распределения по вертикали, обладают внутренней симметрией, что позволяет свести систему уравнений к одному уравнению без повышения порядка.

Для случая высокой теплопроводности включения получено аналитическое решение задачи в рамках приближения, аналогичного приближению Озеена, где, однако, в отличие от обычного приближения Озеена, квазилинеаризация применяется к нелинейным слагаемым в уравнении теплопроводности, а не в уравнении импульса. Анализ этого решения показал, что даже при малых числах Релея конвективное течение на расстоянии от включения, большем его размера, имеет вид четырех горизонтальных вихрей, причем в горизонтальной плоскости, проходящей через ось включения, жидкость движется от него. Скорость течения в горизонтальной плоскости, проходящей через ось включения, убывает с расстоянием от включения как  $x^{-3/2}$ .

Для конечных теплопроводностей включения в рамках приближения, аналогичного описанному выше, получено полуаналитическое решение. Анализ этого решения показал, что конвективное течение в виде горизонтальных вихрей возникает при любых отношениях теплопроводностей жидкости и включения к за исключением случая  $\kappa = 1$ , когда они совпадают и условия устойчивой стратификации не нарушаются. Однако направления течения при  $\kappa > 1$  и  $\kappa < 1$  различны: в первом случае жидкость движется в горизонтальной плоскости, проходящей через ось включения, от включения, а во втором случае к включению. Скорость течения растет с увеличением отклонения  $\kappa$  от единицы.

Аналитические результаты, полученные в рамках приближения типа Озеена, подтверждены сравнением с численными результатами по профилям скорости и структуре течения, полученными в рамках полного нелинейного подхода методом конечных разностей. Хорошее качественное и количественное согласие для значений числа Рэлея  $Ra < 100$  определяет область применимости приближения типа приближения Озеена.

Рассмотренные в работе явления носят общий характер. В частности, аналогичные явления должны наблюдаться в концентрационной конвекции. Общей особенностью этих явлений является то, что слабое нарушение устойчивой стратификации в устойчиво стратифицированной жидкости приводит к возникновению ламинарных конвективных течений в виде горизонтальных структур с горизонтальной составляющей скорости, значительно превышающей вертикальную. Причиной возникновения этих течений является то, что устойчивая стратификация препятствует вертикальным течениям, связанным с работой против силы тяжести, но не препятствует горизонтальным течениям.

## ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКИ НА ПРИМЕРЕ МЕДИ

Майер А.Е.<sup>1</sup>, Манухина К.Д.<sup>2</sup>, Вшивков А.Н.<sup>2</sup>, Плехов О.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь

[ksmanuhina15@gmail.com](mailto:ksmanuhina15@gmail.com)

Механизм лазерной ударной проковки (ЛУП) [1] включает в себя расширение плазменного слоя в области между обрабатываемой поверхностью и сдерживающей прозрачной средой, что повышает эффективность преобразования лазерной энергии в энергию ударной волны (УВ) по сравнению с облучением свободной поверхности металла. Генерируемая лазером УВ пластически деформирует облученный металл, создает остаточные напряжения сжатия и изменяет микроструктуру материала. Остаточные напряжения сжатия являются основным фактором повышения усталостного ресурса материала, поскольку они подавляют развитие трещин и, таким образом, предотвращают разрушение. Выбор правильного режима и алгоритма обработки является ключевым фактором эффективной реализации процесса ЛУП, что требует создания надежной численной модели.

В работе разработана и экспериментально проверена модель ЛУП. Генерация ударной волны лазерным излучением учитывалась через нагрев и испарение поверхностного слоя меди, описываемого широкодиапазонным уравнением состояния. Рассчитанное давление на облучаемой поверхности обобщено в виде искусственной нейронной сети (ИНС), проведено сравнение результатов с аналитической моделью Фаббро [2]. Структура и затухание ударной волны описываются моделью дислокационной пластичности [3] и моделью Джонсона – Кука (ДК) [4]. В экспериментальной части медные пластины различных толщин облучались твердотельным лазером Nd:YAG с длиной волны 1064 нм длительностью на полувысоте 11 нс с различной плотностью мощности, и с помощью фотонного доплеровского измерителя скорости (ФДИС) регистрировались скорости тыльной поверхности облучаемых образцов. Анализ пластин различной толщины позволяет отделить эффекты генерации и затухания ударной волны и независимо проверить соответствующие части модели.

Показано, что модель Фаббро недооценивает давление на границе раздела фаз, поскольку предполагаемое в этой модели стационарное расширение плазмы не реализуется для наносекундных лазерных импульсов. Для согласования экспериментальных кривых с результатами моделирования методом Байеса были подобраны постоянные коэффициенты, входящие в модель ДК.

Разработка модели и численные исследования на основе дислокационной модели пластичности выполнены за счет РНФ, проект № 24-19-00684, <https://rscf.ru/project/24-19-00684/>. Экспериментальная часть работы и расчеты по модели ДК были выполнены в рамках реализации программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329).

### Литература

- [1] Clauer A. H. Laser shock peening, the path to production - Metals 9, 626 (2019) <https://doi.org/10.3390/met9060626>.
- [2] Fabbro R., Fournier J., Ballard P., Devaux D. and Virmont J. Physical study of laser produced plasma in confined geometry - J. Appl. Phys. 68(2), 775 (1990). <http://dx.doi.org/10.1063/1.346783>.
- [3] Mayer A. E., Khishchenko K. V., Levashov P. R., Mayer P. N. Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading - J. Appl. Phys. 113(19), 193508 (2013). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4805713>.
- [4] Johnson G. R., Cook W. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures - Proc. 7th Inf. Sympo. Ballistics 541–547 (1983).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ С Т-ОБРАЗНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[mad@icmm.ru](mailto:mad@icmm.ru)

Закрученные потоки широко распространены в природе [1] и технологических процессах, например, в центробежных насосах, участках трубопроводов за диверторами и в перемешивателях [2]. В частности, для нужд литейной промышленности хорошо зарекомендовали себя магнитогидродинамические (МГД) перемешиватели. В них интенсивные течения электропроводной среды создаются под воздействием бегущих либо вращающихся магнитных полей (ВМП), или их сочетания. Такие аппараты применяются для улучшения качества металлов и их сплавов. Зачастую на производстве не удается разместить индукторы МГД-перемешивателя вокруг всей ёмкости с жидким металлом, поэтому актуальна задача локального воздействия ВМП и исследование области распространения закрученного потока. С фундаментальной точки зрения интересна МГД-интерпретация задачи Куэтта-Тейлора, в которой роль вращающихся с разной скоростью цилиндров выполняют магнитные поля различной интенсивности, закручивающие проводящую среду с разной угловой скоростью и/или в различном направлении.

Для исследования вышеобозначенных задач в лаборатории технологической гидродинамики «ИМСС УрО РАН» была спроектирована и создана экспериментальная установка, состоящая из цилиндрической ячейки с Т-образным сечением и двух индукторов вокруг цилиндров различного диаметра – 98 мм (нижнего) и 212 мм (верхнего). Высоты цилиндров составляют 150 мм. Каждый из индукторов содержит секционный магнитопровод с катушками, надетыми на его зубья, направленные к главной оси цилиндрической ячейки. Причём число катушек (как и секций магнитопровода) в верхнем индукторе в два раза превышает количество катушек в нижнем. Это сделано для того, чтобы обеспечить одинаковую в обоих цилиндрах равномерность по азимуту электромагнитной силы, вращающей жидкий металл. Катушки каждого индуктора подключены по схеме ВМП к трехфазным источникам тока независимо, что позволяет создавать в цилиндрах электромагнитные силы различной величины и направления. Экспериментальная ячейка заполнена эвтектическим сплавом галлия  $\text{Ga}_{86.3}\text{Zn}_{10.8}\text{Sn}_{2.9}$  (вес. %).

Измерения проводились двумя методами. Во-первых, структура течения на поверхности фиксировалась посредством фотографирования. Для этого на поверхность жидкого металла наливалась смесь спирта и кислоты, в результате чего шло образование пузырьков. Анализируя снимки, полученные с определенной частотой, можно было получить картину среднего течения по пузырькам, а также значения скорости. Во-вторых, были получены вертикальные профили скорости с помощью ультразвукового датчика Доплера.

Рассматривались режимы с включенным одним нижним индуктором, а также с работающими нижним и верхним индукторами, включенными как сонаправленно, так и в противоположных направлениях. Сила тока в индукторах также варьировалась независимо. Показано, что в данной постановке задачи реализуются разнообразные закрученные потоки.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

### Литература

- [1] Соколов Д.Д. Современное состояние и перспективы лабораторного динамо-эксперимента // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – № 4. – С. 111—115.  
[2] Вольдек А. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом // Энергия. Ленинград. – 1970. – С. 271.

## ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ АЛЮМИНИИ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН ВРАЩЕНИЯ

Манухина К.Д.<sup>1</sup>, Красников В.С.<sup>1</sup>, Майер А.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск  
[ksmanuhina15@gmail.com](mailto:ksmanuhina15@gmail.com)

В данной работе проведено атомистическое исследование механического отклика и упруго-пластического поведения нанокристаллического алюминия с различными границами зерен, углами разориентации, удельными энергиями и содержаниями примесных атомов меди.

Рассматривались системы, содержащие симметричные границы вращения с различными углами разориентации с осью разориентации [100]: малоугловая граница общего типа с углом разориентации  $4^\circ$ , а так же границы специальных типов  $\Sigma 41a$  ( $12.68^\circ$ ),  $\Sigma 5$  ( $36.87^\circ$ ) и  $\Sigma 29a$  ( $43.61^\circ$ ). Для каждого указанного угла разориентации было создано несколько типов границ, различающихся структурой и удельной энергией на единицу поверхности. Различные структуры границ создавались за счет смещения центров зерен. Для углов  $4^\circ$  и  $18.435^\circ$  дополнительно были рассмотрены системы, содержащие атомы меди, сегрегированные вблизи границы в разной концентрации. Для построения систем и расчета удельной энергии границ был реализован комплексный подход, включающий привлечение различных программных средств манипуляции с атомистическими системами: программный пакет AtomsK [1], программный пакет LAMMPS [2] и разработанные нами программы.

Были исследованы зависимости критического сдвигового напряжения от угла разориентации, а также удельной энергии границы. В зависимости от угла разориентации, удельной энергии границ и концентрации атомов меди наблюдались различные механизмы релаксации, такие как: вращение зерен с проскальзыванием на границах и дислокационные процессы. Проскальзывание происходит во всех системах при превышении сдвиговым напряжением пороговой величины, специфичной для данной границы.

Развитие вращения зерен сопровождается ростом  $S_{xx}$  и  $S_{zz}$  напряжений в системе, что приводит к росту сдвиговых напряжений с зависимостями характерного вида. Этот рост связан с изменением упругих констант решетки, сохраняющейся во внутреннем объеме зерен, вследствие влияния  $S_{xx}$  и  $S_{zz}$  напряжений.

Зарождение дислокаций происходит при относительно низком уровне сдвиговых напряжений в системе. При этом в части систем ( $4.00^\circ$  и  $12.68^\circ$ ) наблюдается дальнейший рост средних сдвиговых напряжений после формирования дислокационных петель, без их роста, что свидетельствует о локальной причине возникновения петель. Причиной формирования дислокационных петель в этом случае выступают локальные напряжения, формирующиеся на границе зерен, вследствие контакта частей зерен друг с другом.

Зародившиеся дислокации могут поглощаться противоположной ГЗ, после чего в системе не остается подвижных дислокаций. В этом случае продолжают реализовываться вращения зерен. Средние сдвиговые напряжения после спада, связанного с дислокационными процессами, продолжают расти с характерной для вращения зерен зависимостью.

Работа поддержана грантом РФФИ № 24-11-20031.

### Литература

[1] Hirel, Comput. Phys. Commun. 2015, 197, 212–219.

[2] Plimpton, J. Comput. Phys. 1995, 117, 1–19

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ НА ОСНОВЕ РЭЛЕЕВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Матвеев В.П., Сероваев Г.С.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[mvp@icmm.ru](mailto:mvp@icmm.ru), [serovaev@icmm.ru](mailto:serovaev@icmm.ru)

Достоверное измерение деформаций в различных участках контролируемой конструкции является важной задачей при создании систем мониторинга механического состояния. Среди множества чувствительных элементов волоконно-оптические датчики (ВОД) обладают значительными перспективами использования для оценки механического состояния конструкций благодаря их компактности, невосприимчивости к электромагнитным помехам, способности работать в широком диапазоне условий окружающей среды. Распределенные ВОД, в свою очередь, позволяют проводить измерения деформаций в сотнях точек вдоль оптического волокна, что открывает возможности для измерения градиентных полей деформаций с высоким пространственным разрешением.

В настоящей работе рассмотрены особенности измерения деформаций с помощью распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния. Приведен анализ уровня шума в показаниях исследуемых ВОД и сопоставление результатов с точечными ВОД на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР). Величина разброса показаний ВОД при отсутствии внешнего механического воздействия на оптическое волокно и изменения температуры окружающей среды определяет минимальный уровень деформаций, который может быть достоверно зарегистрирован с помощью данного метода.

Одной из особенностей распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния является возможность программного выбора длины участка (базы датчика), на котором вычисляется точка измерения деформаций. В отличие от точечных ВОД на основе ВБР, для которых длина измерительного участка фиксирована, для распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния возможен выбор оптимальной для конкретного распределения деформаций базы датчика, что позволяет увеличить точность измерения деформаций, в особенности для существенно неоднородного типа распределения деформаций.

Использование оптического волокна с записанными ВБР для измерения деформаций дает возможность совмещения достоинств двух типов волоконно-оптических датчиков: точечных ВОД на основе ВБР, которые позволяют проводить измерения деформационного отклика при динамическом воздействии на конструкцию и распределенных ВОД, позволяющих с высоким пространственным разрешением измерять распределение деформаций при статическом нагружении конструкции. Наличие в измерительном оптоволокне одной или нескольких ВБР с высокой отражательной способностью, затрудняет проведение распределенного измерения деформаций. Показано, что при использовании диапазона сканирования рефлектометра обратного рассеяния, в который входят резонансные длины волн ВБР, наблюдается высокий уровень шума, не позволяющий выделить полезный сигнал. Предложен подход использования оконного преобразования Фурье с оконной функцией Ханна, позволяющий устранить наличие нечувствительных зон [1].

### Литература

- [1] Matveenko V. P., Serovaev G. S., Distributed Strain Measurements Based on Rayleigh Scattering in the Presence of Fiber Bragg Gratings in an Optical Fiber // Photonics. – 2023. – т. 10, № 8. – с. 868.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ПУАССОНА РАЗНОМОДУЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Матвеев В.П., Фёдоров А.Ю., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Зайцев А.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[mvp@icmm.ru](mailto:mvp@icmm.ru), [fedorov@icmm.ru](mailto:fedorov@icmm.ru), [serovaev@icmm.ru](mailto:serovaev@icmm.ru), [galkina.e@icmm.ru](mailto:galkina.e@icmm.ru), [a-zaitsev@mail.ru](mailto:a-zaitsev@mail.ru)

Для ряда конструкционных и природных материалов имеет место особенность, связанная с различием механических характеристик при растяжении и сжатии, которая получила название разномодульность материалов. В литературе приводится информация о разномодульности конструкционных и природных материалов и различных методах определения упругих постоянных таких материалов. В настоящей работе рассмотрен вариант определения упругих постоянных разномодульных материалов на основе результатов измерения деформаций в образцах, имеющих форму параллелепипеда, при их четырёхточечном изгибе [1] (см. рисунок). Существенным отличием от известных методов является одновременное определение в зонах сжатия и растяжения модулей упругости и коэффициентов Пуассона и использование волоконно-оптических датчиков для измерения деформаций.



Рисунок — Фотографии испытания образца в виде прямоугольной балки

Возможность вычисления упругих постоянных на основе экспериментальной информации о деформациях определяется двумя условиями. Распределение продольных деформаций в зоне их измерения по толщине образца должно соответствовать гипотезам Бернулли – Эйлера, а напряжённо-деформированное состояние в зоне измерения деформаций должно соответствовать одноосному напряжённому состоянию. Первое условие является основой для получения аналитических соотношений, позволяющих на основе измеренных продольных деформаций на поверхности образца вычислить значения модулей упругости при растяжении и сжатии. Второе условие определяет соотношения для вычисления коэффициентов Пуассона при растяжении и сжатии. Поиск размеров, обеспечивающих выполнение сформулированных условий, проводится на основе результатов численного

моделирования четырёхточечного изгиба образца прямоугольного сечения в рамках трёхмерного варианта линейной теории упругости. Приводятся соотношения и численные результаты оценки максимальной погрешности определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона, обусловленной погрешностью измерения деформаций волоконно-оптическими датчиками, погрешностью выполнения гипотез Бернулли – Эйлера и отклонениями от условий одноосного напряжённому состоянию.

Приводятся результаты определения упругих постоянных и оценки максимальной погрешности их определения для дюралюминия, чугуна, гранита, пенобетона, каменной соли.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-77-30008.

### Литература

[1] Matveenko V., Serovaev G., Fedorov A., Galkina E., Zaitsev A. Determination of elastic moduli and Poisson's ratios of bi-modulus materials based on the results of four-point bending test // *Materials and Structures*. – 2024. – Vol. 5, No. 1. – 96.

## ПОВЕДЕНИЕ СУСПЕНЗИИ МИКРООРГАНИЗМОВ ПРИ МОДУЛЯЦИИ ПОЛЯ ТЯЖЕСТИ

Мезенцева А.М., Смородин Б.Л.

*Пермский государственный университет, Пермь*  
[mez.sasha60@gmail.com](mailto:mez.sasha60@gmail.com), [bsmorodin@yandex.ru](mailto:bsmorodin@yandex.ru)

Биоконвекция представляет собой макроскопические течения, вызванные коллективным движением большого числа самодвижущихся (плавающих) микроорганизмов, включая бактерии, жгутиковые простейшие и планктонные личинки некоторых беспозвоночных. Одним из факторов, определяющим формирование биоконвективных структур, является поле тяжести. У гравитактических микроорганизмов, кроме того, средняя скорость плавания определяется направлением и величиной поля тяжести [1,2]. Модуляция ускорения свободного падения влияет на плавательные движения микроорганизмов [2], что отражается на характеристиках биоконвективных структур, например, приводит к изменению их пространственных масштабов [3].

Рассмотрено поведение суспензии гравитактических микроорганизмов в воде, заполняющей горизонтальный слой с твердыми границами, в случае модуляции силы тяжести. Проведен учет перераспределения микроорганизмов за счет самодвижения и гравитационной седиментации. Для случая основного состояния суспензии (механического равновесия) получено распределение концентрации микроорганизмов  $C_0(t, z)$ , зависящее от числа Пекле  $Pe$  (безразмерной скорости плавания), амплитуды и частоты модуляции. Для малых значений числа  $Pe$  решение  $C_0(t, z)$  записано в аналитическом виде. В широком диапазоне частот модуляции профили концентрации микроорганизмов построены в различные моменты периода внешнего воздействия. При высоких и конечных частотах модуляции в слое распространяется вынужденная концентрационная волна. В случае низкой частоты модуляции изменения концентрации в разных точках слоя происходят синфазно.

### Литература

- [1] Childress S., Levandowsky M., Spiegel E.A. Pattern formation in a suspension of swimming microorganisms: equations and stability theory// J. Fluid Mech. – 1975. – Vol. 63. – p. 591-613.
- [2] Richter P. R., Schuster M., Meyer I., Lebert M., and Häder D.-P., Indications for acceleration-dependent changes of membrane potential in the flagellate *Euglena gracilis*// Protoplasma. – 2006. – Vol. 229. – p. 101–108
- [3] Noever D. A. Evolution of bioconvective patterns in variable gravity// Phys. rev. A. – 1991. – Vol. 44. № 8. – P. 5281-5991.

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА БИДИСПЕРСНОЙ МАНИТНОЙ ЖИДКОСТИ**

Меленев П.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь*  
[melenev@icmm.ru](mailto:melenev@icmm.ru)

Экспериментальной базой для предлагаемой работы нам послужила магнитная жидкость, изготовленная в лаборатории структурно-химической модификации полимеров Института технической химии ПФИЦ УрО РАН на основе воды с наполнением, состоящим магнитных наночастиц феррита меди двух типов формы: стержнеобразных (длинной около 60 нм) и сравнительно изометрических (с характерным размером порядка 20 нм). Данные наблюдений показали, что разработанная феррожидкость проявляет более заметный магнитооптический отклик, по сравнению с аналогичным водным магнитным коллоидом на основе наночастиц феррита кобальта изометрической формы. Дальнейшее развитие предложенного варианта магнитной жидкости требует более детального исследования его магнитной составляющей и, в частности, определения соотношения наночастиц разных типов в феррожидкости. К сожалению, экспериментальные данные, полученные методами малоуглового нейтронного и рентгеновского рассеивания, а также просвечивающей электронной микроскопии не позволяют в достаточной мере определить это соотношения и характеристики полидисперсности наночастиц. Предложенная работа посвящена численному моделированию магнитного отклика модельной феррожидкости и подбору её состава, обеспечивающий результаты, аналогичные экспериментальным.

Модель построена на основе подхода крупнозернистой молекулярной динамики и рассматривает магнитную жидкость как систему взаимодействующих частиц. Стерическое взаимодействие, задающее форму частицам, описывается для изометрических частиц изотропным потенциалом Леннарда-Джонса, а для анизотропных – его анизотропным аналогом: потенциалом Гая-Берне [1]. В обоих случаях действие потенциалов ограничено расстоянием позиции экспоненциальной ямы, то есть часть, связанная с притяжением частиц не учитывается. Частицы наделены магнитными моментами неизменной величины (в случае анизотропных частиц, направленными всегда вдоль длинной оси эллипсоида). Частицы взаимодействуют между собой и с внешним магнитным полем, как точечные диполи. Влияние тепловых флуктуаций на позицию частиц и ориентацию их магнитных моментов учтено посредством включения в систему термостата Ланжевена [2]. Расчеты проводились с применением программного пакета ESPResSo 4 [3].

Данные моделирования сравниваются с экспериментальными кривыми намагничивания, полученным на описанных выше образцах магнитных жидкостей, а также с аналитическими зависимостями, определёнными на основе подхода среднего поля [4], разработанного для конденсированных магнитных жидкостей.

### Литература

- [1] Gay J. G., Berne B. J., Modification of the overlap potential to mimic a linear site–site potential // Journal of Chemical Physics. – 1981. – т. 74, № 6 – с. 3316–3319.
- [2] Grest G.S., Kremer K. Molecular dynamics simulation for polymers in the presence of a heat bath // Physical Review A. – 1986. – т. 33, № 5. – с. 3628–3621.
- [3] Weik F., Weeber R., и др. ESPResSo 4.0 – an extensible software package for simulating soft matter systems // The European Physical Journal Special Topics. – 2019. – т. 227, № 14. – с. 1789–1816.
- [4] Ivanov A.O., Kuznetsova O.B. Magnetic properties of dense ferrofluids: An influence of interparticle correlations // Physical Review E. – 2001. – т. 64, № 4. – с. 041405 (12).

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МИКРОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ ВОЗДУХА SIGMAЕСО ПРОГНОЗИРОВАТЬ АЭРАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Мешкова В.Д.<sup>1</sup>, Ветров А.Л.<sup>2</sup>, Филимонов С. А.<sup>1,3</sup>, Шульженко П.Д.<sup>1</sup>, Литвинцев К.Ю.<sup>3</sup>  
Дектерев А.А.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь

<sup>3</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск  
redel-vd@yandex.ru

Программный модуль SigmaEco разработан для моделирования процессов аэродинамики и теплообмена в условиях городской среды. В рассматриваемом модуле реализована микромасштабная математическая модель атмосферы, которая основана на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье—Стокса (RANS) для несжимаемых течений в неупругом приближении [1]. Ранее, рассматриваемая математическая модель была неоднократно верифицирована на основе данных экспериментальных и численных исследований, где результаты сопоставления демонстрируют хорошее согласие. Далее была выполнена валидация модели, на основе данных полевых исследований. В качестве репрезентативной территории рассматривался кампус Пермского государственного университета. Для оценки аэрационного режима кампуса были выполнены полевые исследования в разных точках мониторинга, где фиксировались значения скорости и направления ветра. На основе анализа полученных метеорологических данных, были выбраны значения, которые в дальнейшем были приняты в качестве начальных и граничных условий, а также были определены значения скоростей ветра в точках мониторинга, на основе которых в дальнейшем проводился анализ сопоставления результатов. В рамках данной работы также было выполнено исследование влияния геометрического подобия зданий, пешеходных переходов и городской инфраструктуры на качество результатов численного моделирования. Разработаны две модели кампуса. В первой модели здания представлялись в упрощенном виде, крыши считались плоскими, пешеходные переходы не учитывались. Во второй модели воспроизводилось наиболее полное геометрическое подобие зданий, форм крыш и пешеходных переходов. Полученные численные результаты демонстрируют, что реализуемые численные алгоритмы позволяют адекватно воспроизводить физические процессы, связанные с механикой движения ветрового потока. Также было выявлено, что воспроизводство объекта исследования в упрощенном геометрическом виде приводит к увеличению погрешности результатов при численном исследовании.

В целом, реализованный численный алгоритм в программном модуле «SigmaEco» позволяет адекватно воспроизводить физические процессы, связанные с механикой движения ветрового потока, что позволяет качественно прогнозировать условия аэрационного режима городской среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098, <https://rscf.ru/project/22-61-00098/>

### Литература

[1] Dekteryev, A.A. Litvintsev K.Yu., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B., The development of free engineering software package for numerical simulation of hydrodynamics, heat transfer, and chemical reaction processes // Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2017. – 10. №. 4. – с. 105-112.

## РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСФУНКЦИИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ТЕСТА В НОСИМОМ УСТРОЙСТВЕ

Мизева И.А.<sup>1</sup>, Дзя Я<sup>2</sup>, Хи Ю<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Технологический университет г.Далянь, Далянь, Китай

[mizeva@icmm.ru](mailto:mizeva@icmm.ru), [1907181313@qq.com](mailto:1907181313@qq.com)

Нарушение функции системы микроциркуляции крови является важнейшим проявлением серьезных патологических состояний, включая сахарный диабет, гипертонию и др. На ранних стадиях нарушений системы микроциркуляции можно значительно снизить риск развития осложнений. С этой точки зрения разработка дешевых и простых в использовании тестов для выявления дисфункции микрососудов имеет большое значение. В настоящее время носимые устройства регулярно используются для мониторинга состояния здоровья. Целью данной работы является разработка прототипа носимого устройства для оценки микрососудистого статуса оценки микрососудистого статуса. Для измерения перфузии мы использовали фотоплетизмографию (ФПГ), оптический метод определения локального кровотока. Для оценки функции системы микроциркуляции мы объединили известный тест локального нагревания и ФПГ. В данном пилотном исследовании были проведены измерения отклика перфузии на локальный тест у восьми здоровых молодых добровольцев (возраст  $25 \pm 1$  год). В работе получено, что индекс перфузии, определяемый как амплитуда колебаний сигнала ФПГ на частоте сердечных сокращений, показал типичную реакцию на применяемое нагревание кожи [1]. Форма сигнала воспроизводима и имеет незначительные внутригрупповые различия. Таким образом, в работе показано, что созданный прототип нового портативного устройства для оценки микрососудистой функции является перспективным методом для оценки перфузии ткани. Дальнейшее развитие представленного портативного устройства открывает возможность прогнозирования микроциркуляторных нарушений, что может помочь предотвратить прогрессирование патологии и послужить ориентиром для создания носимых устройств.

Работа выполнена в рамках гос. темы 124012300246-9. Дзя Я. благодарит Китайский стипендиальный фонд Международного исследовательского центра по многофазным потокам в энергетических материалах и медицине проект DUTIO-ZG-202306 и NSFC 5197602.

### Литература

[1] Мизева И.А., Ветрова Д.В. Поведение пульсаций кожного кровотока при локальном нагреве поверхности кожи // Российский журнал биомеханики 2014, Т18, N4, с.513-521

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

Митрополит И.Ю.<sup>1</sup>, Колесниченко И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
[mitropolit.i@icmm.ru](mailto:mitropolit.i@icmm.ru), [kiv@icmm.ru](mailto:kiv@icmm.ru)

Для создания потоков жидких металлов в последние десятилетия широкое распространение получили электромагнитные цилиндрические линейные индукционные насосы (ЦЛИН) [1, 2]. Они активно эксплуатируются в атомной промышленности, на атомных станциях на быстрых нейтронах, где применяется жидкометаллический теплоноситель, в металлургической промышленности, а также в экспериментальных исследованиях [1]. Принцип действия таких насосов основан на генерации внутри цилиндрического канала, заполненного жидким металлом, бегущего магнитного поля, которое индуцирует в металле вихревой ток. Взаимодействие вихревого тока и магнитного поля генерирует электромагнитную силу, которая приводит жидкий металл в движение.

Для интенсификации электромагнитной силы и противодействия возникновению возвратного течения внутри канала можно поместить цилиндрическую вставку, превратив тем самым канал в щелевой. Данный подход активно реализуется в технологических устройствах, однако имеет ряд недостатков. Например, такие насосы сложнее в изготовлении, а выдержать одинаковый щелевой зазор – как правило, несколько миллиметров – по всей длине канала сложно, причем неоднородности в ширине щелевого канала ведут к образованию зон скопления жидкого металла и неоднородности профиля его скорости.

С другой стороны, для устранения возвратного течения, концентрирующегося в центре канала, можно дополнительно накладывать вращающееся магнитное поле, которое будет закручивать транзитный поток внутри цилиндрического канала. Таким образом, за счет создания зон пониженного давления возможно увеличение перепада давления между входом в канал и выходом из него, а за счет уменьшения вклада возвратного течения возможно увеличение скорости потока и, как следствие, расхода насоса. Другими словами, наложение на поток комбинации бегущего и вращающегося магнитных полей может улучшить эксплуатационные характеристики электромагнитного насоса даже без введения в него цилиндрической вставки. Возможность этого изучается в данной работе. Численно исследовано течение жидкого металла, созданного внутри цилиндрического канала совместным действием бегущего и вращающегося магнитных полей разной интенсивности. Получены зависимости перепада давления, расхода и других характеристик от интенсивности вращающегося магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка электромагнитных насосов, реализующих транзитные и спиральные течения жидких металлов в щелевых и цилиндрических каналах устройств металлургии и атомной промышленности».

### Литература

- [1] Вольдек А. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом – Ленинград: Энергия, 1970. – 271 с.  
[2] Khalilov R.I., Kolesnichenko I.V., Annular linear induction pump for liquid sodium // Magnetohydrodynamics. – 2015. – т. 51, № 1. – с. 95-103.

## **ИНДЕНТИРОВАНИЕ ЖЕСТКИХ СЛОЕВ НА МЯГКОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПОДЛОЖКЕ**

Морозов И.А., Беляев АЮ.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[imorozov@icmm.ru](mailto:imorozov@icmm.ru), [belyaev@icmm.ru](mailto:belyaev@icmm.ru)

В режиме индентирования атомно-силовой микроскопии, исследовали механические и прочностные свойства жестких слоев на поверхности мягкого упругого полиуретана. Слои были получены обработкой поверхностей в плазме азота или аргона; варьировали энергию и длительность обработки. Толщина полученных покрытий составила от 4 нм до 50 нм. Материалы индентировали с различным усилием, вызывая повреждение покрытий, исследовали силовой отклик, глубину и площадь отпечатков.

Методом конечных элементов исследовали особенности вдавливания индентора в форме усеченного конуса в жесткий слой на упругой подложке. Варьировали размеры острия индентора, толщину и модуль упругости слоя. Анализировали силовой отклик материала и площадь контакта в зависимости от глубины вдавливания. Установлено, что площадь контакта на малой глубине вдавливания соответствует цилиндрическому индентору, который асимптотически переходит в конус с увеличением глубины индентации. Для рассмотренных случаев модуль упругости поверхности может быть с достаточной точностью определен из начального участка кривой вдавливания, используя упрощенные выражения (без учета реальной площади контакта) по индентации цилиндром. Получив таким образом модуль поверхности и, зная форму индентора и толщину слоя, можно вычислить модуль упругости самого слоя, а также контактную глубину.

Результаты моделирования использованы для определения модуля упругости слоя и прочностных свойств модифицированных плазмой полимеров. В целом, представленный подход может найти применение в исследовании механических свойств жестких слоев на упругом основании.

Работа выполнена в рамках госбюджетной программы АААА-А20-120022590044-7.

## ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА НА АНИЗОТРОПИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ 3Д-ПЕЧАТИ МЕТАЛЛАМИ

Мосина Р.М.<sup>1</sup>, Кривилев М.Д.<sup>1</sup>, Романов К.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Удмуртский государственный университет, Ижевск

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[rmfks@udsu.ru](mailto:rmfks@udsu.ru), [mk@udsu.ru](mailto:mk@udsu.ru), [k.a.kriv@mail.ru](mailto:k.a.kriv@mail.ru)

В современное производство РФ активно внедряются аддитивные технологии (АТ) – способы создания трехмерных объектов путем послойного добавления материала (пластика, металла и др.). В аддитивных технологиях селективного лазерного плавления (СЛП) и прямого лазерного выращивания (ПЛВ) протекают высокоскоростные процессы кристаллизации и охлаждения, научно-обоснованное управление которыми позволяет получать материалы, обладающие улучшенными механическими свойствами.

В работе исследовалось влияние направления выращивания – вертикального (вдоль направления теплоотвода) и горизонтального (поперек направления теплоотвода) – на механические свойства образцов. Исследование проводилось для технологии ПЛВ на нержавеющей стали 08X18H10T. Типичная зеренная структура таких образцов представляет собой удлиненные столбчатые зерна  $\gamma$ -аустенита, расположенные вдоль направления теплоотвода, и остаточный  $\delta$ -феррит [1-2]. В образцах 08X18H10T, полученных АТ, в основном наблюдается столбчато-дендритная структура зерен за счет процессов рекристаллизации.

Теоретические методы механики материалов укрупненно можно отнести к трем подходам: макрофеноменологическому, прямому и гибриднему. В настоящей работе рассматривается параметрическая гибридная модель, разработанная на базе статистической конститутивной модели с прямым рассмотрением элементов микроструктуры. Последняя явно учитывает текстуру, морфологию зерен, наличие дефектов двойникования и включений упрочняющих фаз. Исследование влияния микроструктуры образцов на механические свойства показало ярко выраженную анизотропию, определяемую вытянутостью зерен аустенита. В опытах на одноосное нагружение наблюдается увеличение предела текучести при изменении направления выращивания от 0 до 90 градусов. Эффект упрочнения связан с уменьшением средней длины свободного пробега дислокаций при неупругой деформации. В вертикально выращенных образцах происходит тангенциальный рост зерен, вытянутых вертикально в направлении теплоотвода, длина свободного пробега дислокаций составляет 14 мкм, материал имеет больший предел текучести. При горизонтальном выращивании происходит снижение анизотропии зерен, переход к более равноосной микроструктуре, длина свободного пробега дислокаций составила 50 мкм, что обуславливает уменьшение предела текучести.

Работа частично выполнена в рамках реализации «Стипендия Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов, проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации».

### Литература

- [1] Prakash K. S. et al. Microstructure, Mechanical Properties and Fracture Toughness of SS 321 Stainless Steel Manufactured Using Wire Arc Additive Manufacturing // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2023. – Т. 76. – №. 2. – С. 537-544.
- [2] Rodrigues T. A. et al. Effect of heat treatments on 316 stainless steel parts fabricated by wire and arc additive manufacturing: Microstructure and synchrotron X-ray diffraction analysis // Additive Manufacturing. – 2021. – Т. 48. – С. 102428.



## ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Мохирева К.А.<sup>1</sup>, Свистков А.Л.<sup>1</sup>, Шадрин В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный университет, Пермь  
[lyadovaka@icmm.ru](mailto:lyadovaka@icmm.ru), [svistkov@icmm.ru](mailto:svistkov@icmm.ru), [shadrin@icmm.ru](mailto:shadrin@icmm.ru)

Используемые в промышленности и быту резинотехнические изделия представляют собой высоконаполненные вязкоупругие системы. Наполнитель в эластомерах чаще всего необходим для улучшения механических (жесткость, прочность, износостойкость, сопротивление раздиру и пр.) свойств материала. При этом его присутствие вызывает яркое проявление ряда вязкоупругих эффектов. В поведении наполненных эластомеров наблюдаются зависимость механических свойств от скорости нагружения, существенная диссипация энергии даже в размягченном (уже подверженном нагружению) материале, эффект размягчения Маллинза и другие. Размягчение связано с падением жесткости материала после первого цикла деформирования при заданном уровне нагрузки. Также отметим, что эффект Маллинза может быть полностью или частично снят при "отдыхе" материала по времени очень продолжительном или ускоренном при повышенных температурах [1, 2].

Так как готовые изделия из эластомерных нанокмозитов эксплуатируются в неоднородном поле деформаций, то размягчение будет идти по-разному на разных участках изделия [3, 4]. Все вышеперечисленные особенности вязкоупругого поведения эластомерных материалов необходимо учитывать при конечно-элементных расчетах. А для этого требуется использовать универсальные вязкоупругие модели. Однако современные модели либо не в полной мере учитывают особенности поведения вязкоупругих материалов, либо имеют ограничения в использовании (например, в зависимости от типа наполнителя или уровня деформаций и др.). Предлагаемая нами модель имеет дифференциальный вид, учитывает наблюдаемые вязкоупругие эффекты и проста в использовании. Для уточнения ее параметров проведено апробирование определяющих соотношений для высоконаполненных вязкоупругих систем при разной скорости нагружения и разной кратности удлинения в экспериментах со сложной историей нагружения.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы (рег. номер АААА-А20-120022590044-7).

### Литература

- [1] Mullins L. Softening of Rubber by Deformation // Rubber Chemistry and Technology. – 1969. – vol. 42, № 1. – p. 339-362.
- [2] Шадрин В.В. Восстановление механических свойств резин в результате термостатирования // Высокомолекулярные соединения. Сер Б. – 2005. – т. 47, № 7. – с. 1237-1240.
- [3] Соколов А.К., Свистков А.Л., Комар Л.А., Шадрин В.В., Терпугов В.Н. Проявление эффекта размягчения материала в изменении напряженно-деформированного состояния шины // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – т. 9, № 3. – с. 358-365.
- [4] Shadrin V.V., Svistkov A.L., Mokhireva K.A., Garishin O.K. Peculiarities of using dumbbell specimens made of elastomeric materials subject to finite deformation in complex loading tests // Letters on Materials. – 2023. – vol. 13, № 1. – p. 56-61.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Мусихин А.Ю., Зубарев А.Ю.

<sup>1</sup>Уральский Федеральный университет, Екатеринбург.  
[Antoniusmagna@yandex.ru](mailto:Antoniusmagna@yandex.ru), [A.J.Zubarev@urfu.ru](mailto:A.J.Zubarev@urfu.ru)

Одним из важных классов магнитных композитов являются магнитоактивные эластомеры (МАЭ), состоящие из микронных частиц, внедренных в эластомер. Эти материалы объединяют гибкость полимеров и магнитные свойства наполнителя. Под воздействием внешнего магнитного поля частицы МАЭ могут выстраиваться в упорядоченные структуры вдоль силовых линий поля. Это приводит к значительным изменениям свойств материала, таких как реологические и электрические характеристики, форма образца и т.д.

Целью данной работы является теоретическое исследование мягких магнитоактивных эластомеров, синтезированных в отсутствие и при наличии магнитного поля, анализ их магнитомеханического поведения при изотропном и анизотропном распределении магнитных частиц в полимерной матрице, а также изучение влияния межчастичных взаимодействий на модуль упругости при сдвиговой деформации образцов этих композитов [1].

Предложена теоретическая модель, описывающая магнитореологический эффект в композитах с мягкой матрицей и микронными магнитными частицами синтезированных как в отсутствие, так и под действием магнитного поля. Теория основана на решеточной модели и иерархическом принцип объединения частиц в цепочки: с каждым этапом объединения количество частиц в цепочке удваивается. Стационарная длина цепочки в данном поле определяется балансом между силами магнитного притяжения между частицами и упругого сопротивления среды их смещениям. Определены зависимости статического макроскопического модуля сдвига от внешнего магнитного поля. Результаты соответствуют экспериментам [1].

### Литература

[1] Костров С.А., Городов В.В., Музафаров А.М., Крамаренко Е.Ю. // Высокомолекулярные соединения. Серия Б, издательство ФГБУ "Издательство "Наука" (Москва), том 62, № 6. 2022.

## АНАЛИЗ АТОМИСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ: УПРУГИЙ И НЕУПРУГИЙ РЕЖИМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Мушанкова К.А.<sup>1</sup>, Степанова Л.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара  
[mushankova.ka@ssau.ru](mailto:mushankova.ka@ssau.ru), [stepanova.lv@ssau.ru](mailto:stepanova.lv@ssau.ru)

Работа посвящена анализу полей напряжений у вершины трещины в наноскопической пластине с центральным дефектом с помощью метода молекулярной динамики. Исследование нацелено на изучение эволюции поля напряжений при переходе от упругого к нелинейным режимам деформирования. Вычисления были выполнены в открытом пакете Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator (LAMMPS) для различных механических условий нагружения пластины для монокристаллических материалов с гранцентрированной кристаллической решеткой при различных температурах с применением потенциала внедренного атома (EAM). На рис. 1 приведена кривая напряжение-деформация, на которой ясно видны участки упругого и неупругого деформирования, а также показаны картины распределения напряжений в пластине с трещиной и их изменение с течением времени. Проанализированы угловые и радиальные распределения компонент тензора напряжений.

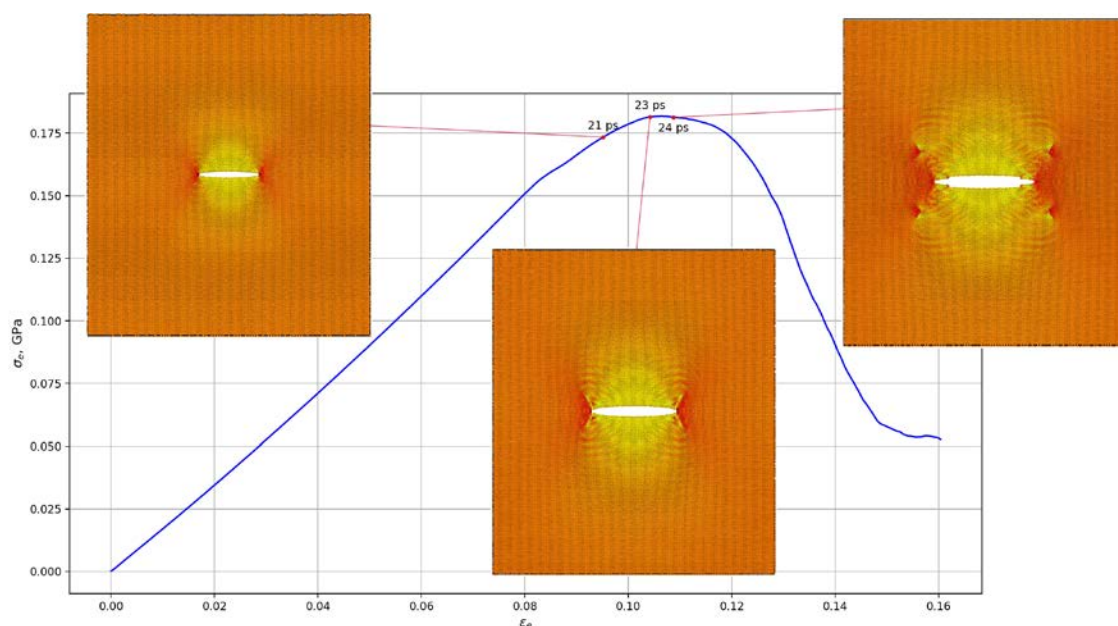


Рис. 1. Кривая напряжение-деформация с визуализацией полей напряжений пластины на нелинейном участке деформирования на временных шагах 21 пс, 23 пс, 24 пс

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 25-21-00272).

### Литература

- [1] Stepanova L.V., Mushankova K. A. Atomistic and continuum Ascertainment of The crack tip stress fields in anisotropic elastic cubic media // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2024. – Vol. 133. – P. 104613.
- [2] Мушанкова К. А., Степанова Л.В. Определение коэффициентов асимптотического ряда для полей напряжений на основании молекулярно-динамических вычислений // Прикладная механика и техническая физика. DOI 10.15372/PMTF202415537.
- [3] Степанова Л. В., Мушанкова К.А. Атомистическое и континуальное определение полей напряжений у вершины трещины в анизотропных средах с кубической сингонией // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Т. 86, № 1. – С. 15-25.

## СПОСОБЫ ПРАВКИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

Назарова Е.Д<sup>1</sup>, Филин В.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург  
npk3@crism.ru

Для магистральных газопроводов высокой прочности их эксплуатационная безопасность обеспечивается испытаниями на трещиностойкость. Технические условия на трубы требуют испытаний на трещиностойкость поперечных образцов в полной толщине, нагружаемых по схеме трехточечного изгиба, с определением критических значений CTOD (Crack Tip Opening Displacement). В случае, когда заготовка образца имеет исходную кривизну (например, вырезанная из трубы), требуется ее правка.

Известно, что пластические деформации порядка 5% являются критическими для изменения свойств металла [3]. Поэтому одним из условий в задаче было не допустимость деформации более 5%. В работе была смоделирована правка образцов таким образом, чтобы избежать дополнительной пластической деформации в рабочей зоне образца. Также, поскольку в условиях заводских лабораторий сложно проконтролировать качество правки, была разработана специальная оснастка по результатам расчета. При первых расчетах было выявлено расхождение экспериментальных данных со значениями, полученными численным методом. Для объяснения расхождения расчета с экспериментом решалась задача о гибке листа с последующим экспандированием полученного равностороннего многоугольника в цилиндрическую трубу. В результате стало ясно, что следует задавать градиент (или ступенчатое изменение) свойств металла заготовки по толщине [4]. Проведенные расчеты позволили получить совпадающие с экспериментальными прогибы и рассчитать геометрические параметры оснастки, в результате использования чего стал не нужен визуальный контроль при правке и была обеспечена повторяемость формы выправленных заготовок. Выправленные на изготовленных по заданным размерам оснастках образцы успешно испытаны на трещиностойкость. Данная работа легла в основу создания цифровых двойников материалов, неоднородных по толщине, при расчетах на прочность.

### Литература

- [1] ISO 12135-2016 Metallic materials — Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness. Second Edition. ISO, 2016. - 106p.
- [2] ISO 15653-2018 Metallic materials — Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds. Second edition. ISO, 2018 - 54p.
- [3] Леонов В. П., Антонова С.Д., Сафронова Н.Н., Нестерова Е.В. Влияние предварительной пластической деформации на характеристики стали PCE40Z // Вопросы материаловедения, 2003, № 2(34), С. 50 - 66
- [4] Расчетные оценки эффективности мероприятий для обеспечения равномерного роста усталостной трещины при испытании на трещиностойкость образцов полной толщины, Филин В. Ю., Мизецкий А. В., Виноградов О. П., Садкин К. Е., Назарова Е. Д., Порошков А. В., Пышкин Д. А. // Вопросы материаловедения, 2021, № 4, С. 179 – 189

## КРИТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР В УСЛОВИЯХ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЙ И МИКРОГРАВИТАЦИИ

<sup>1</sup>Наймарк О.Б., <sup>1</sup>Баяндин Ю.В., <sup>2</sup>Игнатъев П.С., <sup>1</sup>Никитюк А.С., <sup>1</sup>Уваров С.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

*<sup>2</sup>АО «Уральский оптико-механический завод» Екатеринбург*

[naimark@icmm.ru](mailto:naimark@icmm.ru)

В соответствии с определением Шредингера ДНК как биологического кристалла, механизмы трансформации в ДНК и клетке ассоциируются с нелинейной динамикой дефектов («открытых состояний»). Статистическая термодинамика «открытых состояний» в ансамбле ДНК позволила установить вид неравновесной свободной энергии в терминах «параметра порядка», определяющего деформацию, индуцированную «открытыми состояниями». Установлен специальный тип критических явлений (структурно-скейлинговые переходы), связывающий нелинейную динамику параметра порядка с условиями «термализации»-«эффективной температурой», отражающей взаимодействие открытых комплексов, и роль последних в различных сценариях экспрессии генов. Коллективные моды «открытых состояний» имеют природу автомодельных решений и могут рассматриваться как механизм, определяющий динамику экспрессии генов, транскрипции и деления клеток. Разнообразие структурно-скейлинговых переходов и типов метастабильности потенциала (неравновесной свободной энергии), обусловленных «открытыми состояниями», позволили предложить объяснение ландшафтов Вэдингтона при эволюции клеток. Показано, что динамика «открытых состояний» как дефектов может быть ассоциирована с «пластичными» состояниями нормальных клеток и «квазихрупкими» состояниями раковых клеток с соответствующей динамикой экспрессии. Установленные закономерности «критичности» в поведении «открытых состояний» использованы для интерпретации оригинальных экспериментальных данных прижизненной динамики клеток, полученных методом лазерной (интерференционной) микроскопии. Анализ флуктуаций «фазовых толщин» позволил установить существование мультифрактальных спектров для нормальных (пластичных) клеток и монофрактальный для «охрупченных» раковых клеток [1-3]. Обсуждаются качественные изменения фенотипов клеток в условиях микрогравитации. Исследования выполнялись в рамках проекта ФЦП № 075-02-2018-147 «Разработка программно-аппаратного комплекса для ранней диагностики злокачественных опухолей и анализа эффективности действия противоопухолевых препаратов методами лазерной интерференционной микроскопии и инфракрасной термографии», поддержаны государственным контрактом № 124020200116-1.

### Литература

1. Nikitiuk A. , Bayandin Yu, Naimark O. Statistical thermodynamics of DNA with open states Physica A, 607, (2022) P.128-156 .
2. Bizzarri M., Naimark O., Nieto-Villa J., Fedeli V., Giuliani A. Complexity in Biological Organization: Deconstruction (and Subsequent Restating) of Key Concepts. Entropy. 2020. V. 22. № 8. P. 885. doi: 10.3390/e22080885
3. Naimark O.B. , et al., DNA Transformation, Cell Epigenetic Landscape and Open Complex Dynamics in Cancer Development, Mathematical Biology and Bioinformatics 2020. V. 15. № 2. P. 87-104. doi: 10.17537/2020.15.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТА-БИОМАТЕРИАЛОВ. НАТУРНЫЕ И ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Нежинская Л.С.<sup>1</sup>, Боровков А.И.<sup>1</sup>, Маслов Л.Б.<sup>1,2</sup>, Жмайло М.А.<sup>1</sup>, Тарасенко Ф.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург  
[nezhinskaya.l@compmechlab.ru](mailto:nezhinskaya.l@compmechlab.ru)

<sup>2</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Иваново

Настоящая работа посвящена изучению механических свойств мета-биоматериалов с применением натуральных и виртуальных испытаний. Данное исследование позволяет сформировать математические модели мета-биоматериалов различной топологии для их дальнейшего применения при разработке изделий в области тканевой инженерии при лечении костных дефектов.

В работе представлены результаты натуральных и виртуальных испытаний мета-биоматериалов, образованных ячейкой поверхностного типа Gyroid и ячейкой балочного типа Diamond для значений объемной доли твердой фазы 30, 50 и 70%. Натурные испытания проводятся для сценариев квазистатического растяжения, сжатия до разрушения и малоциклового упругого симметричного нагружения. Образцы изготавливаются методами аддитивных технологий из титанового сплава Ti6Al4V. Для корректного анализа результатов натуральных испытаний и их воспроизведения в виртуальной среде была измерена фактическая объемная доля напечатанных образцов, которая отличалась от модельных значений в редких случаях более, чем на 20%.

Для проведения виртуальных испытаний мета-биоматериалов также выполнялось определение механических характеристик сплошного материала с целью построения математической модели материала. Для этого проводились испытания на одноосное растяжение. По полученной в ходе испытания деформационной кривой определялись модуль Юнга, предел текучести и характеристики кривой пластичности. Затем путем полного воспроизведения проведенных натуральных испытаний в цифре выполнялась калибровка полученной модели материала для повышения точности моделирования. В результате была получена валидированная математическая модель материала и постановка задачи, позволяющая проводить множественные виртуальные испытания для мета-биоматериалов различной топологии и прогнозировать их эффективные механические свойства и деформационное поведение (рисунок 1).

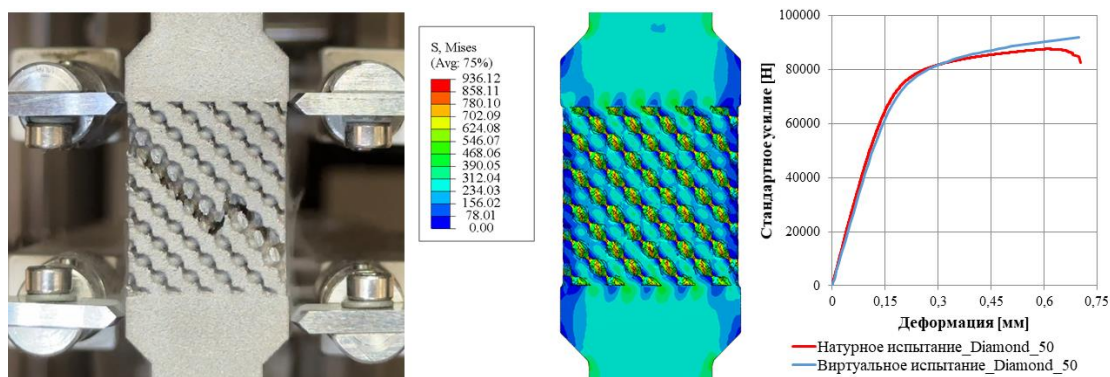


Рисунок 2. Сравнение результатов натурального и виртуального испытаний для образца мета-биоматериала типа Diamond для значения объемной доли в 50%

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00882).

## ЭФФЕКТ ПОВЫШЕНИЯ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ПРИ НАВОДОРОЖИВАНИИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

Нечаева А.В.<sup>1</sup>, Шалагаев В.В.<sup>1,2</sup>, Полянский В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-диагностический центр «Научно-производственная фирма «Русская лаборатория», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт Проблем Машиноведения РАН, Санкт-Петербург  
[pomazova@yandex.ru](mailto:pomazova@yandex.ru), [vladimir.shalagaev@ruslab.org](mailto:vladimir.shalagaev@ruslab.org), [pva@ipme.ru](mailto:pva@ipme.ru)

Исследовано влияние растворенного водорода на динамическую прочность, морфологию излома и микроструктуру стали 09Г2С при различных температурах и относительно низких концентрациях водорода. Были подготовлены образцы из стали в состоянии поставки, насыщенные водородом методом катодной поляризации и вырезанные из стенок химического реактора после его промышленной эксплуатации в течение 100000 ч в водородосодержащей среде. Средние по объему образца концентрации водорода во всех образцах были примерно одинаковыми. Испытывались также исходные образцы из стали в состоянии поставки и образцы с разным временем выдержки на воздухе после окончания катодной поляризации.

Получен парадоксальный результат. По сравнению с ненасыщенными водородом исходными образцами, ударная вязкость после насыщения водородом возросла, причем, при некоторых температурах испытаний - в несколько раз. Микроскопическое исследование изломов показало, что рост ударной вязкости связан с водородным расслоением и растрескиванием, которое происходит в стальной матрице под воздействием водорода. При катодной поляризации образуются плоские трещины вдоль перлитных полос, плоскости которых были ориентированы перпендикулярно к направлению приложенной нагрузки во время ударных испытаний. В этих образцах наблюдается только транскристаллитное растрескивание. Изменение характера излома после выдержки насыщенных водородом образцов на воздухе, в частности, образование вторичных трещин и специфическое расслоение металла, указывает на то, что взаимодействие водорода с исследуемой сталью продолжается после завершения процесса насыщения водородом. Такое взаимодействие приводит к дополнительному изменению ударной вязкости. Время, в течение которого образцы выдерживались после насыщения водородом перед проведением динамических испытаний, имеет критическое значение. Это связано с тем, что чем дольше образец «выдерживался», тем более выраженным становилось расслоение. Количество трещин увеличивалось, их длина и ширина были меньше, чем у первичных трещин, образующихся в процессе насыщения водородом. В образцах, насыщенных водородом в процессе эксплуатации, обнаружено только микрорастрескивание по границам зерен. Ударная вязкость при этом также увеличивалась по сравнению с ненасыщенной водородом сталью в состоянии поставки, что не соответствует общепринятым представлениям о последствиях водородной хрупкости сталей. Можно предположить, что повышение ударной вязкости связано с тем, что ударные трещины тормозятся и меняют направление роста при встрече с межфазными границами на берегах плоских водородных трещин, что приводит к снижению скорости их распространения и, как следствие, к кратному повышению значения ударной вязкости. Таким образом, водородное растрескивание, несмотря на свою потенциальную опасность, может в определенных условиях способствовать улучшению ударной вязкости сталей. Обнаружено также, что растрескивание стали 09Г2С в процессе эксплуатации принципиально отличается от растрескивания при искусственном насыщении водородом методом катодной поляризации, что необходимо учитывать при проведении исследований водородной хрупкости и использовании их результатов в промышленности.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ СЛП МАТЕРИАЛОВ В ОБЛАСТИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Никитин А.Д.<sup>1</sup>, Шанявский А.А.<sup>1</sup>, Саурин В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*  
[nikitin\\_alex@bk.ru](mailto:nikitin_alex@bk.ru), [106otdel@mail.ru](mailto:106otdel@mail.ru), [saurin@ipmnet.ru](mailto:saurin@ipmnet.ru)

В настоящее время технология селективного лазерного плавления (СЛП) активно внедряется в производство элементов современных инженерных конструкций, подверженных циклическим нагрузкам. Известно, что усталостная прочность СЛП материалов ниже характеристик материала, полученного с помощью традиционных технологий, и в значительной степени зависит от настройки параметров 3Д-печати.

В настоящей работе исследуется связь технологических параметров производства СЛП материала с формируемой структурой и его усталостной прочностью при высокочастотном нагружении. Исследования проведены при одноосном нагружении на корсетных образцах в режиме высокочастотного растяжения-сжатия ( $R=-1$ ) на резонансной частоте 20 кГц [1]. Изготовление экспериментальных образцов проводилось для различных направлений печати слоев по отношению к оси образца (горизонтальная, вертикальная и диагональная ориентация). Все полученные поверхности усталостного разрушения проанализированы на электронном сканирующем микроскопе. На поверхности излома наблюдаются ярко выраженные растрескивания материала в направлении перпендикулярном росту усталостной трещины. Плоскости этих растрескиваний совпадают с ориентацией слоев при производстве материала. На поверхностях, образованных в результате растрескивания, наблюдаются нерасплавленные частицы порошкового материала, что говорит о неоптимальном выборе параметров сканирования, приведших к появлению дефектов микроструктуры в процессе печати образца. Результаты для СЛП образцов сравнены с результатами испытаний горячекатаных образцов. Сделаны выводы о потенциальных причинах формирования обнаруженных дефектов материала при СЛП производстве.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ, проект № 23–19–00640.

### Литература

[1] Bathias C., Paris P.C., Gigacycle fatigue in mechanical practice. Dekker. N-York. 2004. P. 328.



## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Никитин И.С.<sup>1</sup>, Никитин А.Д.<sup>1</sup>, Стратула Б.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*  
[i\\_nikitin@list.ru](mailto:i_nikitin@list.ru), [nikitin\\_alex@bk.ru](mailto:nikitin_alex@bk.ru), [stratula@matway.ru](mailto:stratula@matway.ru)

В процессе изготовления детали по технологии селективного лазерного плавления (СЛП) поверхность обладает повышенной шероховатостью и насыщена концентраторами напряжений. После поверхностной обработки статические прочностные свойства изделия приближаются к свойствам детали, изготовленной классическими методами формовки давлением. Однако, в силу специфики эксплуатации, второй важной характеристикой, помимо статических свойств, является сопротивление усталости. Экспериментальные данные показывают [1], что у аддитивно изготовленных деталей усталостные характеристики значительно хуже, чем у деталей стандартных технологий производства, и для компенсации этого падения требуется настройка параметров процесса СЛП для минимизации количества пор и непроплавов [2].

В работе проведено экспериментальное и численное исследование процесса селективного лазерного плавления (СЛП) титановых и алюминиевых сплавов. В энтальпийной формулировке [3] решена задача формирования ванны расплава и затвердевшего трека в порошковом слое на подложке под действием подвижного лазерного луча. Исследованы геометрические параметры одиночного и множественных треков в зависимости от мощности, скорости и шага лазерного луча, а также геометрическая структура и типы дефектов многослойного СЛП построения сплавов в зависимости от параметров процесса.

На основе предложенной ранее мультимодальной модели усталостного разрушения исследовано влияние одиночных и множественных СЛП дефектов на усталостную прочность при высокочастотном нагружении. Показано, что внутренняя неоднородность материалов при различных направлениях 3Д-печати методом СЛП может приводить к подповерхностному зарождению усталостных трещин и существенно снижать усталостную прочность и долговечность СЛП образцов и изделий при длительном высокочастотном нагружении.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 23-19-00640.

### Литература

- [1] Babaytsev A., Nikitin A., Ripetskiy A. VHCF of the 3D-Printed Aluminum Alloy AlSi10Mg // *Inventions*. 2023. 8(1):33.
- [2] S. Leuders et al. On the mechanical behavior of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance // *International Journal of Fatigue*. 2013. Vol. 48. Pp. 300-307.
- [3] R.E. White. An Enthalpy Formulation of the Stefan Problem// *SIAM. Journal on Numerical Analysis*. 1982. Vol. 19. No. 6. Pp. 1129–57.

## МЕХАНОБИОЛОГИЯ КЛЕТКИ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Никитюк А.С., Наймарк О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[nas@icmm.ru](mailto:nas@icmm.ru), [naimark@icmm.ru](mailto:naimark@icmm.ru)

Изменение фенотипа клеток может происходить под влиянием внешних и внутренних стимулов биохимического и/или физического характера. Среди физических сигналов значительную роль играет гравитационное воздействие. Известно, что биологические объекты (микроорганизмы, клетки, бактерии, ткани) претерпевают выраженные изменения структуры и функциональных свойств в условиях микрогравитации. В частности, различные клеточные линии человека (эпителиальные клетки желез, остеобласты, раковые клетки легких) обнаруживают существенные изменения в их морфологии как в случае реальной, так и имитирующей микрогравитацию лабораторных условиях [1]. Ввиду этого актуальной является задача изучения особенностей влияния гравитации на формирование фенотипа клеток с физической точки зрения. Цель работы состоит в сравнительном исследовании характерных реакций цитоскелета клетки эукариот, находящейся в различных гравитационных условиях, на основе статистико-термодинамической модели процесса ее деформирования [2]. В работе обсуждаются ориентационные свойства актинового цитоскелета клетки эукариот и вводится, описывающий их, тензорный параметр порядка, который ассоциируется с деформацией, обусловленной упорядочением актиновых филаментов. Определен вид свободной энергии цитоскелета клетки. Ориентационно-вязкоупругое тело используется как модель представительного объема клетки эукариот. С соблюдением первого и второго законов термодинамики, а также принципа Онсагера получены эволюционные уравнения для ориентационно-вязкоупругого тела. Также в работе предложено использовать непрерывный спектр релаксации напряжений в клетке эукариот, что позволяет получить более корректные результаты моделирования для широкого диапазона времен. Выполнено численное моделирование реакций цитоскелета клетки на гравитационное воздействие различной величины, включая значения  $10^{-6}g$  и  $1g$ . По результатам расчетов проведен сравнительный анализ закономерностей деформации цитоскелета, на основе которого установлены особенности влияния гравитации на механическое поведение клеток.

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы 124020200116-1.

### Литература

- [1] Po A. et al. Phenotypic transitions enacted by simulated microgravity do not alter coherence in gene transcription profile // *npj Microgravity*. – Springer US, 2019. – Vol. 5, № 1. – P. 1–13.
- [2] Nikitiuk A.S. et al. On thermodynamics and relaxation properties of eukaryotic cells // *Int. J. Non. Linear. Mech.* – Elsevier Ltd, 2023. – Vol. 157. – P. 104532.

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ НА ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК МАГНИТНОЙ НАНОКОМПОЗИТНОЙ ЧАСТИЦЫ

Новак Е.В.<sup>1</sup>, Пьянзина Е.С.<sup>1</sup>, Кузнецов А.А.<sup>2</sup>, Канторович С.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург

<sup>2</sup>University of Vienna, Wien, Austria

[ekateina.novak@urfu.ru](mailto:ekateina.novak@urfu.ru)

Современные биомедицинские приложения требуют создания материалов, которые могут контролироваться и управляться с помощью внешних стимулов. Одним из основных требований в этой области является то, что эти стимулы не должны мешать каким-либо биологическим или физиологическим процессам. Одним из наиболее перспективных методов является использование магнитных полей, поскольку они не оказывают негативного воздействия на биологические процессы. Магнитные нанокompозитные частицы типа «multicore particle» (ММНЧ) представляют собой плотные кластеры однодоменных магнитных нанокристаллов, встроенных в жесткую немагнитную матрицу. В то время как зерна (ядра) внутри ММНЧ обычно имеют характерный линейный размер порядка 10 нм, размер ММНЧ может варьироваться от десятков до нескольких сотен нанометров. Эти частицы обладают широким спектром потенциальных применений, таких как направленная доставка лекарств, магнитная гипертермия и биосенсоры [1]. Однако понимание основных механизмов, управляющих поведением ММНЧ, остается не полным.

В данной работе с помощью компьютерного моделирования методом броуновской динамики в сочетании с уравнением Ландау-Лифшица-Гилберта был изучен статический и динамический магнитный отклик одиночных ММНЧ. Мы рассматривали две конфигурации ММНЧ: одна с произвольно ориентированными осями анизотропии ядер, другая - с осями, выровненными параллельно. Мы показали, что магнитные отклики ММНЧ, как статические, так и динамические, определяются сложным взаимодействием между магнитной анизотропией ядер и силой межъядерных магнитных взаимодействий. Мы доказали, что для одиночной ММНЧ в жидком носителе распределение осей анизотропии внутри нее не влияет на ее начальный магнитный отклик. Эти выводы имеют решающее значение для совершенствования конструкции ММНЧ для различных приложений, включая магнитную гипертермию, хранение данных и направленную доставку лекарств, где требуется точный контроль над магнитными характеристиками.

Работа выполнена при поддержке РФФ № 25-22-00270.

### Литература

[1]. Dutz S. Are magnetic multicore nanoparticles promising candidates for biomedical applications? //IEEE Transactions on Magnetism. 2016. – Vol. 52, № 9. P. 1-3.

## ПОЛИМЕРНЫЙ МОСТ КАК ОСНОВА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Нурмухаметов Д.И., Чеснокова М.А., Гордеева А.И., Пономарев Р.С.

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
danur95@yandex.ru, mariachesnokova@psu.ru, gordeeva@psu, rsponomarev@gmail.com

В настоящее время среди волоконно-оптических датчиков популярность приобрели точечные датчики на основе интерферометра Фабри-Перо. Такие датчики обладают рядом преимуществ перед аналогами: простота конструкции, компактность, высокая чувствительность и работоспособность при высоких температурах [1, 2]. Тем не менее, компоненты, используемые для создания чувствительных элементов датчиков, как правило дорогостоящие и труднодоступны. В настоящей работе в качестве рабочего материала для формирования интерферометра Фабри-Перо на конце оптического волокна предлагается использовать широко распространенный прозрачный в видимом спектре и ближнем инфракрасном диапазоне полимерный фотоматериал.

Для создания чувствительного элемента датчика 100x10 мкм капля полимера размером 1-3 мкл наносилась между двух соосно расположенных состыкованных оптических волокон. После нанесения материала волокна отдалялись друг от друга с помощью механических подвижек. Под действием сил поверхностного натяжения между торцами формировался жидкий мостик, который полимеризовался под действием ультрафиолета. Вариация времени и мощности облучения, а также скорости движения торцов волокон относительно друг друга позволила подобрать оптимальные условия для получения более длинного и тонкого полимерного моста. После затвердевания вблизи одного из торцов волокон под контролем микроскопа структура скалывалась, а на поверхности второго волокна формировался столбик с плоским торцевым срезом. Две границы раздела сред: оптическое волокно–полимер и полимер–воздух формировали интерферометр Фабри-Перо.

Тестирование датчика проходило внутри климатической камеры, где температура линейно изменялась от 30 до 50° С с шагом 5° С выдержкой на каждой ступени 5 минут при скорости нагрева 4°С/мин. Интерференционный сигнал от лазерного источника, проходящий через чувствительный элемент, снимался с помощью оптического спектроанализатора. Отраженное от интерферометра Фабри-Перо излучение с дискретным набором частот подавалось на фотоприемник, выходной ток которого представляет собой комбинацию перекрестных биений всех попадающих в зондирующее излучение компонент оптической частотной гребенки.

Исследования показали, что под действием температуры менялись оптические (показатель преломления полимера) и геометрические характеристики чувствительного элемента датчика (длина полимерного столба), что в свою очередь приводило к сдвигу спектра и изменению амплитуды оптического сигнала. В ходе экспериментов было установлено, что чувствительность предложенного датчика превосходит показатели классических волоконно-оптических датчиков (11 пм/°С) и составляет 44 пм/°С.

Исследование выполнено за счет средств Государственного задания №FSNF-2024-0001.

### Литература

- [1] Yang M. et al. Fiber optic sensors based on nano-films //Fiber Optic Sensors: Current Status and Future Possibilities. – 2017. – С. 1-30.
- [2] Mohammed P. A., Wadsworth W. J. Long free-standing polymer waveguides fabricated between single-mode optical fiber cores //Journal of Lightwave Technology. – 2015. – V. 33. – No. 20. – С. 4384-4389.

## ОЦЕНКА МОМЕНТНО-ПОВОРОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ ФРОНТАЛЬНЫХ СТЕЛЛАЖЕЙ

Нуштаев Д.В.<sup>1</sup>, Ардатов К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Северсталь Менеджмент», Москва

<sup>2</sup> Московский авиационный институт, Москва

[dv.nushtaev@severstal.com](mailto:dv.nushtaev@severstal.com), [ardatov-k@yandex.ru](mailto:ardatov-k@yandex.ru)

Стальные стеллажные системы являются неотъемлемым элементом современной складской и производственной инфраструктуры. Производительность и надежность стеллажных систем напрямую зависит от эффективности узлов крепления, их работа является важнейшей по отношению к работе всей конструкции стеллажа. Одним из направлений по улучшению эксплуатационных характеристик, является применение сталей более высокого класса прочности. Требования стандартов предполагают сугубо экспериментальную оценку моментно-поворотной характеристики узлов крепления с последующей её обработкой и вычислением расчетных значений изгибной жесткости и предельного изгибающего момента. Однако, принимая во внимание высокую стоимость и длительность организации натуральных экспериментов, рядом авторов предложены аналитические и численные модели оценки моментно-поворотных характеристик узлов крепления [1-3].

В работе проводится оценка возможности и перспектив замены материала кронштейнов фронтальных стеллажей на стали повышенного класса прочности. Проведена экспериментальная оценка моментно-поворотной характеристики узлов крепления, изготовленных из сталей 08ПС и С420. Разработана и валидирована по эксперименту детализированная конечно-элементная модель узла крепления. На её основе проведена оценка напряженно-деформированного состояния конструкции и выполнены расчеты для дополнительных марок сталей.

Исследовано влияние класса прочности стали на уровень изгибной жесткости и величину предельного изгибающего момента узла крепления. Рассмотрены зоны пластического деформирования кронштейна в ходе нагружения и их влияние на поведение конструкции. Показано, что на начальном этапе нагружения, деформирование узла крепления происходит преимущественно упругой области без значимого влияния класса прочности стали на изгибную жесткость. Кронштейны из высокопрочных марок сталей продемонстрировали большую протяженность квазилинейного участка моментно-поворотной характеристики и увеличение величины предельного изгибающего момента. Сделан вывод о том, что замену материала кронштейна с 08ПС на С420 целесообразно проводить для высоконагруженных узлов крепления. Помимо гарантированного увеличения предела прочности на изгиб, использование С420 обеспечит снижение общих прогибов балки за счет увеличения квазилинейного участка диаграммы. Для узлов, работающих в менее нагруженных условиях, увеличение класса прочности стали может рассматриваться с точки зрения улучшения запасов по усталостной прочности с увеличением срока эксплуатации.

### Литература

- [1] Prabha P., Marimuthu V., Saravanan M., Jayachandran S.A. Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks // Journal of Constructional Steel Research – 2010 – Vol. 66 – С.863-872.
- [2] Mohan V., Prabha P., Rajasankar J., Nagesh R., Raviswaran N. Cold-formed steel pallet rack connection: an experimental study // Int J Adv Struct Eng – 2015.
- [3] Dumbrava F., Cerbu C. Experimental Study on the Stiffness of Steel Beam-to-Upright Connections for Storage Racking Systems // Materials – 2020 – Vol. 13.

## **ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ**

Оборин В.А., Банников М.В., Соковиков М.А., Наймарк О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[oborin@icmm.ru](mailto:oborin@icmm.ru)

В работе проведено исследование кинетики роста усталостных трещин в титановых (BT6, BT8) и алюминиевых (АМг6) сплавах в режиме сверхмногоциклового усталости при предварительном динамическом деформировании. Актуальность постановки определяется важными приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полетного цикла при случайных динамических воздействиях.

Предварительное нагружение образцов осуществлялось динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского при скоростях деформации до  $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ , после чего образцы подвергались циклическим нагрузкам на испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 при принудительном воздушном охлаждении сжатым воздухом с последующим изучением фрактографии изломов разрушенных образцов.

Усталостное нагружение проводилось на ультразвуковой испытательной машине резонансного типа при уровнях напряжений 100-500 МПа. Ультразвуковая испытательная машина позволяет испытывать материалы на базе  $10^9 - 10^{10}$  циклов с амплитудой от 1-го и до нескольких десятков микрон с частотой 20 кГц, что сокращает время испытания до нескольких дней.

Циклическое нагружение при указанных режимах показало значительное снижение усталостной долговечности с  $2.23 \cdot 10^9$  критического количества циклов в исходном (недеформированном) состоянии до  $6.38 \cdot 10^3$  предварительно нагруженного сплава BT-8 при уровне напряжений 585 МПа. Снижение предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава BT6 с уровня напряжения 450 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 130 МПа достигало 346%, соответствующего критическому количеству циклов  $\sim 1.3 \cdot 10^8$ . Усталостное нагружение предварительно нагруженных образцов из сплава алюминия и магния АМг6 показало снижение до  $\sim 25\%$  предельного напряжения разрушения с уровня напряжения 152 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 112 МПа, соответствующего критическому количеству циклов  $\sim 10^9$ .

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы №124020200116-1.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕСЧАНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ДНА В ПЕРИОДИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ

Огородников Л.Л., Поплевин А.В.

*Институт теоретической физики имени Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка*

[noel95@mail.ru](mailto:noel95@mail.ru)

Проблема формирования структур на поверхности песка в виде барханов, на песчаном дне водного потока и в объеме воды под действием волн, распространяющихся на поверхности, уже давно вызывает огромный интерес у исследователей. Так в [1] описано два различных типа поверхностных структур, которые могут образовываться при колебательном движении над слоем песка: тип «вихревой» ряб и тип ряби «катящегося зерна». Основное различие между этими двумя типами ряби заключается в том, что рябь от перекатывающихся зёрен имеет гораздо меньшее отношение высоты к длине и, возможно, из-за этого не образуется вихрей с подветренной стороны гребня. Это направление до сих пор остаётся актуальным: в [2] сообщается об экспериментальном исследовании механизма формирования и развития изолированных зон ряби над песчаным слоем при однонаправленном распространении поверхностных волн. Теоретические модели, описывающие формирования песчаных структур в однородных периодических потоках были предложены в работах [3-6].

В данной работе предлагается теоретическое описание процесса формирования песчаных структур поверхностными волнами и возникающими вихрями. Используемый подход позволяет описывать, как на дне при умеренных амплитудах накачки формируются полосы из частиц, имеющие свою мелкомасштабную структуру. Также подход позволяет определить зависимость характерного масштаба песчаных структур и периода мелкомасштабных структур от параметров задачи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-72-30006.

### Литература

- [1] Bagnold R. A. Motion of waves in shallow water. Interaction of waves and sand bottoms // Proc. Roy. Soc. (A), 1946, Vol. 187, pp. 1 – 18.
- [2] Sarkar S., Roy S., Barman K. et al. Turbulence effect on the mechanics of ripple formation under regular wave // J. Earth Syst. Sci., 2022, Vol.126, p.126.
- [3] Blondeaux P. Sand ripples under sea waves Part 1. Ripple formation //Journal of Fluid Mechanics. – 1990. – Т. 218. – С. 1-17.
- [4] Roos P. C., Blondeaux P. Sand ripples under sea waves. Part 4. Tile ripple formation //Journal of fluid mechanics. – 2001. – Т. 447. – С. 227-246..
- [5] Vittori G., Blondeaux P. Sand ripples under sea waves Part 3. Brick-pattern ripple formation //Journal of Fluid Mechanics. – 1992. – Т. 239. – С. 23-45..
- [6] Lyne W. H. Unsteady viscous flow in a curved pipe //Journal of Fluid Mechanics. – 1971. – Т. 45. – №. 1. – С. 13-31.

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОТИВОПОЛОЖНО ВРАЩАЮЩИХСЯ ВИХРЕВЫХ МГД-ТЕЧЕНИЙ**

Озерных В.С., Колесниченко И.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[ozernykh.v@icmm.ru](mailto:ozernykh.v@icmm.ru)

В промышленности, где используют жидкий металл в качестве теплоносителя, возникает потребность в создании насосов, перекачивающих жидкий металл бесконтактным способом. Высокая электропроводность жидких металлов дает возможность эффективного управления потоками в них и, контроля его характеристик с помощью электромагнитных сил. Настоящая работа посвящена исследованию течения в цилиндрическом канале, возникающего в зазоре электромагнитного индуктора, генерирующего вращающиеся магнитные поля. В процессе развития течения в рассматриваемом канале возникает взаимодействие разнонаправленных течений в индукторах друг с другом, которое приводит к развитию неустойчивости Кельвина Гельмгольца и формированию вихревых движений.

Математическая модель основана на уравнениях электродинамики сплошных сред, которые описывают процесс взаимодействия электрических и магнитных полей с движущимися электропроводными средами [1]. Одним из основных уравнений является уравнение переноса магнитного поля движущейся электропроводной жидкостью, сформулированное из уравнений Максвелла и закона Ома для движущихся сред. Два других основных уравнения – это уравнение Навье-Стокса со слагаемым, учитывающим действие электромагнитной силы, а также уравнение неразрывности.

Рассматривается цилиндрическая ячейка, заполненная жидким металлом. В начальный момент времени жидкость покоится. Накладывается внешнее электромагнитное воздействие, которое приводит жидкость в движение. В замкнутой области действия индукторов возникает вихревое течение, которое увлекает за собой все больше жидкости. Получено, что взаимодействие вихрей начинается в пристеночной области на равном удалении от индукторов. Происходит формирование неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [2]. После этого возмущения распространяются от пристеночной области к оси цилиндра. Структура течения быстро становится неоднородной. Эта структура течения возникает на этапе его развития от состояния покоя до выхода на равновесное значение кинетической энергии. На горизонтальном сечении в середине ячейки структура имеет вид чередующихся по азимуту вихрей. Время существования устойчивой периодической структуры течения нелинейно зависит от интенсивности силового воздействия, характеризуемого числом Тейлора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка электромагнитных насосов, реализующих транзитные и спиральные течения жидких металлов в щелевых и цилиндрических каналах устройств металлургии и атомной промышленности».

### Литература

- [1] Вольдек А. И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: «Энергия», 1970. – 272 с.
- [2] Monchaux R., Berhanu M., Bourgoin M., et.al. Generation of a magnetic field by dynamo action in a turbulent flow of liquid sodium // Physical Review Letters. 2007, 98 (4), 044502.



## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ГАРТМАНА ПРИ ЛИНЕЙНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПО ТОЛЩИНЕ СЛОЯ

Окательев Р.С.<sup>1,2</sup>, Зиканов О.Ю.<sup>3</sup>, Фрик П.Г.<sup>1,2</sup>, Колесниченко И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт механики сплошных сред, Пермь*

<sup>2</sup> *Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

<sup>3</sup> *University of Michigan, Дирборн, США*

[okatev.r@icmm.ru](mailto:okatev.r@icmm.ru)

В работе рассматривается обобщение классического течения Гартмана на случай неоднородного распределения электропроводности жидкости. Рассматривается линейное распределение электропроводности по толщине слоя. Параметром, характеризующим максимальное отклонение проводимости от среднего по высоте слоя значения, является угловой коэффициент  $\kappa$ . Наличие неоднородности электропроводности приводит к появлению неоднородности силы Лоренца и, как следствие, к искажению профилей скорости [1]. На рисунке 1а приведены профили скорости для значения числа Гартмана  $Ha=50$  при различных значениях параметра  $\kappa$ .

Даже при весьма умеренных значениях числа Гартмана ( $Ha=15$ ) в профилях скорости появляются точки перегиба, наличие которых может свидетельствовать о потенциальной неустойчивости таких течений. Однако в действительности быстрее неустойчивости точек перегиба развивается другая неустойчивость, связанная с формированием структур в виде продольных вихрей.

В работе численно исследована устойчивость описанных течений. В рамках линеаризованной постановки задачи определены зависимости скорости роста энергии возмущений скорости от параметра  $\kappa$  для различных чисел Рейнольдса  $Re$  (рис. 1б). Построена нейтральная кривая на плоскости параметров ( $Re$ - $\kappa$ ). Показано, что в диапазоне умеренных чисел Рейнольдса  $Re < 20000$  неустойчивость развивается при достаточно больших отклонениях электропроводности от однородного распределения ( $\kappa \approx 0.4$ ).

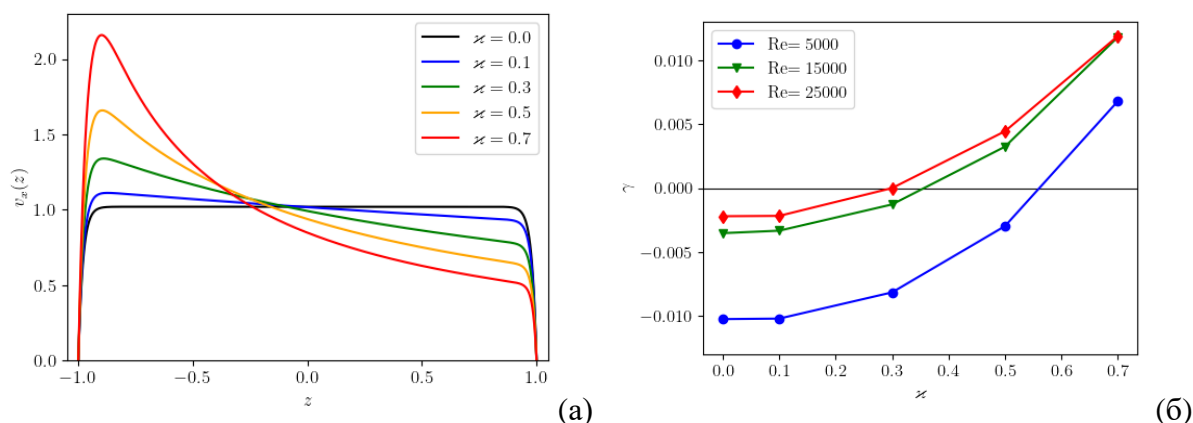


Рисунок 1. Профили скорости при различных значениях параметра  $\kappa$  (а) и зависимости скорости роста энергии возмущений скорости от параметра  $\kappa$  при различных значениях числа Рейнольдса (б). Расчеты проведены при значении числа Гартмана при  $Ha=50$

### Литература

[1] Окательев Р.С., Фрик П.Г., Колесниченко И.В., Течение Гартмана в слое жидкости с пространственно неоднородными свойствами //Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2023. – т. 15, № 3. – с. 34-42.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ СФЕРЫ

Окатьев Р.С.<sup>1</sup>, Степанов Р.А.<sup>1</sup>, Фрик П.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред, Пермь

[okatev.r@icmm.ru](mailto:okatev.r@icmm.ru)

Задачи исследования геофизических и астрофизических крупномасштабных полей зачастую рассматриваются в рамках сферической геометрии. Несмотря на то, что фактические поля являются трехмерными, в силу различных ограничений методов наблюдения, получаемые данные оказываются заданными на некоторых сферических поверхностях. По этой причине актуальной оказывается задача анализа спектральных свойств трехмерных полей по двумерным данным на сферической поверхности.

Основным инструментом, который применяется для спектрального анализа сигналов на сферических поверхностях, является разложение по сферическим гармоникам. Вычисление коэффициентов разложения требует значительных временных затрат или использования специальных алгоритмов. Кроме того, спектральное разрешение такого преобразования ограничено разрешением сетки на экваторе. Альтернативой является использование одномерных долготного (при фиксированной широте) и широтного (при фиксированной долготе) преобразований Фурье.

В данной работе на искусственных случайных сигналах с заданными спектральными свойствами показано, что использование одномерных преобразований Фурье позволяет воспроизвести спектральные свойства в области умеренных волновых чисел. На рисунке 1 показана реализация случайного поля (а) с показателем спектра  $-3$ , переходящим в  $-5/3$  в области больших волновых чисел, а также вычисленные с использованием различных подходов спектры (б). Разрешения сетки на экваторе не позволяет определить масштаб изменения наклона спектра при использовании подхода с разложением по сферическим гармоникам. Вычисление долготного преобразования Фурье вблизи полюсов позволяет увеличить спектральное разрешение и определить спектральные свойства в области больших волновых чисел.

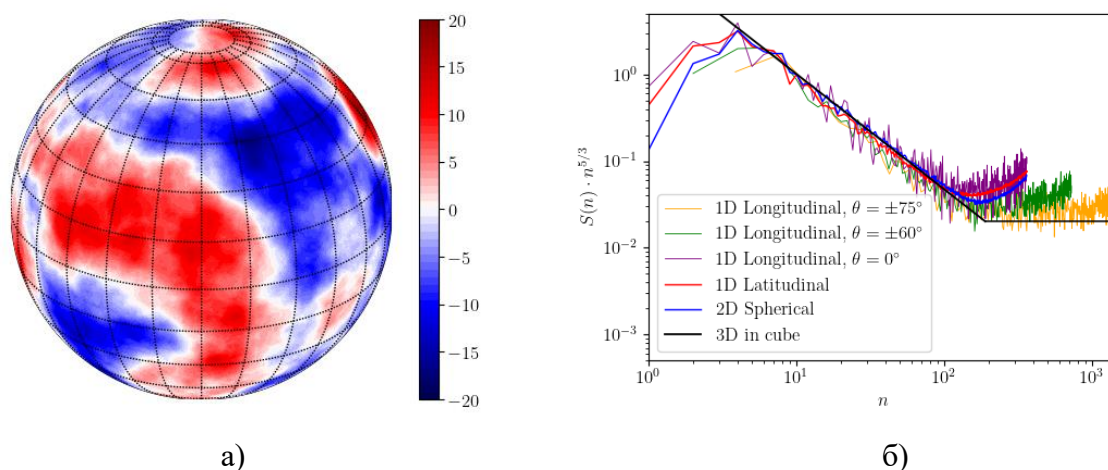


Рисунок 1. Пример сгенерированного поля на сфере (а) и его компенсированные спектры (б). Спектр исходного трехмерного поля показан на правом графике черной линией.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-61-00098.

## ОБОБЩЕНИЕ ОДНОЙ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СТРУН

Осипенко М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[osipenko.michael@yandex.ru](mailto:osipenko.michael@yandex.ru)

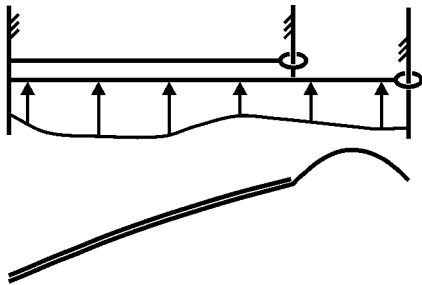


Рис. 1. Известная задача и единственная картина контакта в ней  
единственная картина контакта – полное прилегание струн (Рис. 1). Эта задача допускает различные обобщения [2–5]. Рассмотрим еще одно обобщение: левые и правые концы струн закреплены упруго (Рис. 2). В этом случае, аналогично [1], можно сформулировать

Имеется известная задача [1] об одностороннем контакте струн (Рис. 1). В отсутствие нагрузки струны прилегают друг к другу. Левые концы струн закреплены, правые свободны. Под заданной внешней нагрузкой струны слабо деформируются с возможным отставанием. Требуется найти контактную нагрузку; зная ее, можно наглядно представить решение, изобразив картину контакта. В [1] сформулирована математическая постановка задачи, доказана единственность решения и установлено, что для любых параметров задачи (длины и натяжения струн, плотность заданной нагрузки) есть единственная картина контакта – полное прилегание струн (Рис. 1). Эта задача допускает различные обобщения [2–5]. Рассмотрим еще одно обобщение: левые и правые концы струн закреплены упруго (Рис. 2). В этом случае, аналогично [1], можно сформулировать

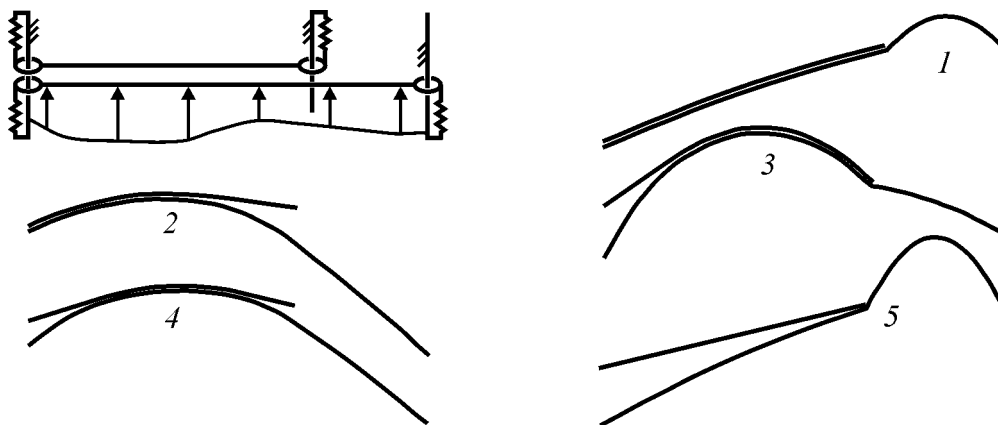


Рис. 2. Обобщение задачи и пять вариантов картины контакта

математическую постановку задачи и доказать единственность решения. Но здесь при различных параметрах задачи возможны пять вариантов картины контакта (Рис. 2): 1 – полное прилегание, 2 – неполное прилегание с отрезком отставания справа, 3 – неполное прилегание с отрезком отставания слева, 4 – неполное прилегание с отрезками отставания слева и справа, 5 – контакт только в одной точке.

### Литература

- [1] Осипенко М.А. Об одной контактной задаче для системы струн // Вестник ПГТУ. Прикладная математика и механика. – 2005. – № 1. – С. 82–86.
- [2] Осипенко М.А. Контактная задача для двух струн с переменными натяжениями // Вестник ЮУрГУ. Серия “Математика. Механика. Физика”, 2014, т. 6, № 3. – С. 66–71.
- [3] Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Касаткин А.А. Особенности контактных задач для систем струн и балок со слабо закрепленными элементами // Вестник ПНИПУ. Механика, 2015, № 1. – С. 121–129.
- [4] Осипенко М.А. Контактные задачи для двух струн под знакопеременной нагрузкой и двух тяжелых струн // Математическое моделирование в естественных науках, Материалы XXXII Всероссийской конференции. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2023, С. 247–350.
- [5] Осипенко М.А. Использование топологического свойства векторного поля при решении одной контактной задачи для струн // Математическое моделирование в естественных науках, Материалы XXXIII Всероссийской конференции. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2024, С. 290–294.

## ОРИЕНТАЦИЯ ЗОНЫ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ХРУПКОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ ПРИ ИСТИННОМ ТРЕХОСНОМ СЖАТИИ

Пантелеев И.А.<sup>1</sup>, Ложкин Д.В.<sup>1</sup>, Ляховский В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Геологическая служба Израиля, Иерусалим, Израиль

*pia@icmm.ru, lozhkin.d@icmm.ru, vladimir.lyakhovsky@gmail.com*

Для обеспечения безопасности проведения горных работ в сложных горно-геологических условиях требуется непрерывное совершенствование методов прогнозирования деформационного поведения горных пород в естественных условиях залегания. Данной проблеме, на сегодняшний день, посвящено большое количество научных работ. Можно выделить несколько основных направлений исследований: экспериментальное исследование влияния величины промежуточного главного напряжения на деформационное поведение горных пород, разработка новых и обобщение известных критериев прочности пород, исследование влияния неравнокомпонентного трёхосного напряженного состояния на проницаемость, фильтрацию и ползучесть горных пород. При этом вопросу ориентации плоскости разрушения (зоны локализованной поврежденности) в условиях истинного трёхосного сжатия при различном соотношении главных напряжений уделяется недостаточно внимания [1]. Хотя именно информация о совокупности ориентации плоскостей сдвига/скола в полевых условиях может быть использована для оценки действующего регионального поля напряжений.

В данной работе, базирующейся на неклассической модели нелинейной упругости, предложенной во второй половине прошлого века академиком РАН В.П. Мясниковым [2], в приближении тонкого слоя рассматривается задача определения оптимальной с точки зрения эффективности диссипации энергии ориентации зоны локализованной поврежденности в хрупком твердом теле, находящемся в условиях истинного трёхосного сжатия. Ориентация зоны локализованной поврежденности определяется двумя углами: углом между зоной и направлением действия максимального главного напряжения и углом между зоной и направлением действия промежуточного главного напряжения.

В результате решения задачи определены оптимальные углы наклона зоны локализованной поврежденности. Показано, что с ростом промежуточного напряжения наблюдается уменьшение угла наклона зоны относительно направления действия максимального главного напряжения, а также сужение интервала возможной ориентации зоны относительно направления действия промежуточного главного напряжения. На основе анализа соотношения величин сдвиговых компонент тензора напряжений в плоскости зоны локализованной поврежденности установлены возможные направления сдвига по этой зоне: сброс, горизонтальный сдвиг и сбросо-сдвиг. Полученные теоретические решения качественно и количественно совпадают с результатами экспериментов по истинному трёхосному сжатию горных пород, опубликованных в российской и зарубежной литературе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-77-30008.

### Литература

- [1] Heping Xie, Jun Lu, Cunbao Li, Minghui Li, Mingzhong Gao. Experimental study on the mechanical and failure behaviors of deep rock subjected to true triaxial stress: A review // International Journal of Mining Science and Technology. – 2022. – v. 32, № 5. – p. 915-950.
- [2] Ляховский В.А., Мясников В.П. О поведении упругой среды с микронарушениями // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1984. – № 10. – с. 71-75.

## УЧЕТ ДЕФЕКТНОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ ОЦЕНКЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦЕЛИКОВ

Пантелеев И.А.<sup>1</sup>, Ломакин И.С.<sup>2</sup>, Барях А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Горный институт УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

*ria@icmm.ru*

Одним из способов подземной добычи полезных ископаемых является камерная система разработки, которая предусматривает поддержание вышележащей толщи грузонесущими элементами различных размеров. На Верхнекамском месторождении солей горные работы ведутся с оставлением части продуктивных пород в виде целиков, поддерживающих налегающие геологические пласты. Устойчивость целиков напрямую связана с обеспечением сохранности водозащитной толщи, которая отделяет водоносные горизонты от выработанного пространства рудника. Нарушение сплошности водозащитной толщи влечет за собой прорыв пресных вод в горные выработки, интенсивное растворение соляных пород и в конечном итоге затопление рудника, сопровождающееся огромными социально-экономическими последствиями. Поэтому задача уточнения несущей способности междукамерных целиков на этапе проектирования и эксплуатации месторождения остается актуальной и направлена на учет факторов различной физической природы.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния снижения механических свойств на напряженно-деформированное состояние междукамерного целика в случае меняющегося эффективного давления и при разных пропорциях целика (фактора формы). Для описания снижения механических свойств использованы зависимости, полученные из экспериментов по ступенчатому одноосному сжатию образцов сильвинита. Предложена аппроксимация зависимости касательного модуля деформации сильвинита от максимальной приложенной нагрузки гиперболическими функциями. Из условия постоянства модуля объемного сжатия получено соотношение для описания изменения коэффициента Пуассона. Численные эксперименты проведены для трех значений форм-фактора (ширина целика меньше, равна или больше высоты очистной камеры) и монотонно меняющегося эффективного давления в пределах, междукамерного целика, находящегося в условиях полной подработки.

В результате проведенных исследований определены степень изменения механических свойств в среднем по объему целика, относительное изменение конвергенции его боковых стенок для различных уровней эффективных давлений и фактора формы. Показано, что учет дефектности соляных пород неоднозначно сказывается на степени нагружения целика, определенной по эквивалентным напряжениям. Отдельно рассмотрен вопрос целесообразности оценки несущей способности целика по эквивалентным деформациям.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

## **ВЛИЯНИЕ ПЛЕНКИ СУРФАКТАНТА НА СТРУКТУРУ ОСРЕДНЕННОГО ТЕЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПОЛУПОГРУЖЕННОЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СФЕРОЙ**

Панькова Н.В., Мизёв А.И.

*Институт механики сплошных сред, Пермь*  
[pankova.n@icmm.ru](mailto:pankova.n@icmm.ru), [alex\\_misev@icmm.ru](mailto:alex_misev@icmm.ru)

Структура конвективного движения в многофазных гидродинамических системах существенно зависит от наличия на межфазной поверхности поверхностно-активного вещества (сурфактанта) [1]. В случае дивергентного течения, симметрично сжимающего адсорбированный слой, эффект Марангони приводит к формированию на границе раздела неподвижной застойной зоны, в пределах которой выполняется условие баланса поверхностных и вязких касательных напряжений. Ранее было показано [2], что превышение последними критического значения приводит к неустойчивости механического равновесия адсорбированного слоя и формированию в пределах застойной зоны многовихревого течения. В докладе задача о взаимодействии с адсорбированным слоем рассмотрена на примере осредненного течения, генерируемого полупогруженной осциллирующей сферой. Задача интересна тем, что течение формируется двумя независимыми механизмами, каждый из которых по-разному зависит от наличия в системе сурфактанта. Первая составляющая течения генерируется в вязком погранслое на погруженной части сферы и представляет собой осесимметричное течение с ярко выраженной струей от нижнего полюса и возвратным центростремительным движением. Вторая часть генерируется бегущей поверхностной волной и представляет собой центробежное на поверхности осесимметричное течение. Эксперименты проведены в стеклянной кювете диаметром 20 см, заполненной слоем жидкости, в центре которого расположена полупогруженная сфера диаметром 2 см, совершающая вертикальные колебания с частотой 40 Гц и амплитудой до 0.8 мм. Исследованы три жидкости: изопропиловый спирт, водоглицериновая смесь и вода различной степени очистки. В первом случае поверхность свободна от сурфактанта, и оба течения развиваются только за счет механизмов, обусловленных вязкостью, интенсивность которых растет по мере роста амплитуды. Во втором случае, в силу большой вязкости волна быстро затухает и волновой механизм генерации течения не реализуется, и в жидкости развивается погранслоное течение, направленное к центру вблизи поверхности. Наличие остаточного неконтролируемого сурфактанта приводит к появлению на всей поверхности застойной зоны, которая по мере увеличения амплитуды осцилляций и, следовательно, интенсивности течения теряет устойчивость с формированием многовихревого течения в ее центральной части. В экспериментах с водой течение генерируется обоими механизмами, но соотношение их интенсивностей и общая структура зависят от количества сурфактанта в системе. При малом его содержании на границе раздела центробежная часть течения оттесняет сурфактант к периферии, формируя там застойную зону с многовихревым движением, тогда как в центральной части поверхности развивается осесимметричное радиальное течение. При больших поверхностных концентрациях сурфактанта вся поверхность является застойной и неподвижной. Увеличение амплитуды колебаний приводит к ее неустойчивости и развитию многовихревого течения без формирования центрального осесимметричного течения.

### Литература

- [1] Manikantan H., Squires T.M. Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows //Journal of fluid mechanics. – 2020. – V. 892. – P1.  
[2] Mizev A., Shmyrov A., Shmyrova A. On the shear-driven surfactant layer instability //Journal of Fluid Mechanics. – 2022. – V. 939. – A24.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОД ТКО ГРУНТОВЫМИ ЗАЩИТНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

Паршакова Я.Н.<sup>1</sup>, Висков М.В.<sup>1,2</sup>, Катаев Р.И.<sup>1,3</sup>, Картавых Н.Н.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

<sup>2</sup> *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

<sup>3</sup> *Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*  
[parshakova@icmm.ru](mailto:parshakova@icmm.ru), [mihail.viskov@gmail.com](mailto:mihail.viskov@gmail.com), [rus.kataef@gmail.com](mailto:rus.kataef@gmail.com), [kartavykh@psu.ru](mailto:kartavykh@psu.ru)

Представлены результаты численного моделирования распространения фильтрационных вод от полигона размещения твердых коммунальных отходов (ТКО). Рост численности населения и процесс урбанизации приводит к увеличению образования ТКО, что является насущной проблемой для мирового сообщества. Одним из самых распространенных способов удаления твердых коммунальных отходов является их размещение на полигонах (свалках), что может негативно сказываться на окружающей среде. Одним из основных загрязняющих воздействий свалок является попадание образующихся в них фильтрационных вод (фильтрата) в подземные и поверхностные воды и грунтовый массив их основания.

В данной работе было проведено исследование миграции фильтрата через защитные сооружения старой свалки, которая функционирует уже более тридцати лет. На территории изучаемого полигона ТКО загрязненная жидкость по дренажной системе направляется в пруд-отстойник. Основным природоохранным сооружением, которое препятствует проникновению фильтрационных вод за пределы объекта размещения ТКО, является противофильтрационная дамба. Такие дамбы на полигонах ТКО периодически ремонтируются и восстанавливаются во время эксплуатации, так как они подвержены разрушению по естественным причинам. Восстановление рассматриваемой в работе дамбы произошло в 2017 году. Было осуществлено прогнозное моделирование миграции фильтрационных вод на основе данных натурных измерений. Изучался процесс перетекания фильтрата через дно накопителя в подстилающие слои пород. Получены оценки времени установления стационарного профиля концентрации, времени продвижения примеси до ближайшего водоема (озера, находящегося за дамбой, защищающей площадку полигона) и значений концентрации в точке поступления в водоем, как без учета, так и с учетом слабой адсорбции загрязнений в грунте. С помощью численного моделирования были прослежены основные стадии процесса распространения примесей, а по результатам вычислений построены картины концентрации в различные моменты времени. Оценена фильтрующая способность дамбы, защищающей природную среду от попадания в нее фильтрата ТКО. Показано, что в предельном случае максимального количества осадков фильтрат достигнет озера за дамбой через 4–5 лет.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00214, <https://rscf.ru/project/23-11-00214/>.

### Литература

- [1] Иванов В. Н., Лобачева Л. В., Кундяков В. В. Моделирование распространения загрязнений в подземном потоке от полигона твердых бытовых отходов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. - №5. – с. 183–187.
- [2] Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Циберкин К.Б. Численное моделирование инфильтрации жидких отходов из хранилища в прилегающие грунтовые воды и поверхностные водоемы // Вычислительная механика сплошных сред. - 2015. - Т. 8, №3. - С. 310–318.

## АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОД В ГРУНТОВОЙ ТОЛЩЕ ОСНОВАНИЯ ПОЛИГОНА ТКО

Паршакова Я.Н.<sup>1</sup>, Иванцов А.О.<sup>1</sup>, Катаев Р.И.<sup>1,2</sup>, Картавых Н.Н.<sup>1,2</sup>, Висков М.В.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

<sup>3</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[parshakova@icmm.ru](mailto:parshakova@icmm.ru)

Представлены особенности численного исследования динамики фильтрационных вод в толще основания полигона твердых коммунальных отходов. В процессе жизнедеятельности полигона ТКО образуются загрязненные стоки – фильтрат. Негативное воздействие фильтрата, образованного в свалочном теле полигона, связана с возможностью его проникновения в грунтовые и, как следствие, с последующим просачиванием в поверхностные водные объекты. При организации полигона укладывается подложка в виде противофильтрационного экрана, которая выполняет барьерную функцию. Особую важность для защиты окружающей среды имеет отслеживание путей миграции фильтрата за пределы полигона ТКО. Для выявления риска загрязнения подземных вод была разработана модель потока подземных вод и массопереноса фильтрата. Показано, что при проведении моделирования распространения фильтрата необходимо учитывать, что фильтрат из-за наличия примесей является тяжелым, нежели вода, которой насыщены слои грунта основания полигона. Если фильтрат скапливается в понижении полигона определяющим фактором его динамики, является развитие неустойчивости Релея-Тейлора. Как правило, в процессе численного моделирования на верхней границе задается постоянство концентрации, соответствующее непрерывному поступлению фильтрата. При этом техногенный слой, расположенный до изоляционного слоя, исключается из рассмотрения. Тело полигона представляет собой слой пористой среды, которая образована насыпными, неуплотненными и рыхлыми грунтами. Так если процесс накопления фильтрата в теле полигона является быстрым по сравнению с временами диффузии в пористой среде, необходимо учитывать техногенный слой при проведении моделирования. Необходимость учёта техногенного слоя детально исследована в рамках настоящей работы.

Если техногенный слой не учитывается, то рассматривается трехслойная система. При этом диффузионное расползание концентрационного фронта наблюдается на протяжении 50 лет. Случай соответствует горизонтальному эксперименту с чистой диффузией, в котором наблюдаемый профиль концентрации сравнивается с аналитическим решением для нелинейной диффузии, из которого выводится эффективный коэффициент диффузии. В случае учета техногенного слоя после диффузионного распространения фильтрата в течение двух месяцев развивается неустойчивость Релея-Тейлора, которая приводит к экспоненциальному ускорению выноса примеси из понижения. Количество фильтрационных вод, поступивших в водоносный слой за 50 лет в случае учета техногенного слоя (четырёхслойная система) в шесть раз превосходит количество примеси, поступившей в слой аргиллита в случае трехслойной системы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00214, <https://rscf.ru/project/23-11-00214/>.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВДУВА КОЛЬЦЕВОЙ ГАЗОКАПЕЛЬНОЙ СТРУИ В ПОПЕРЕЧНЫЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ НАГРЕТЫЙ ПОТОК

Пахомов М.А.

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
pma41976@yandex.ru, pakhomov@itp.nsc.ru*

Выполнен численный расчет локальной структуры течения газочапельной радиальной кольцевой струи, вдуваемой в цилиндрический канал при наличии поперечного однофазного нагретого воздушного турбулентного потока. Расчеты проведены с использованием осесимметричного RANS подхода при вариации основных параметров двухфазного потока: начальный размер капель воды  $d_1 = 0-50$  мкм и их массовая концентрация  $M_{L1} = 0-0.1$ . Турбулентность газа описывается с применением модели переноса компонент Рейнольдсовых напряжений, записанной с учетом двухфазности течения. Для моделирования динамики дисперсной фазы используется эйлеров подход [1].

Целью настоящей работы является проведение численного исследования локальной структуры и тепловых характеристик при вдуве кольцевой газочапельной струи в цилиндрический канал при наличии поперечного однофазного нагретого воздушного турбулентного потока.

Все численные расчеты выполнены для случая вдува кольцевой газочапельной струи в трубу для случая вертикального опускного движения основного однофазного воздушного потока при атмосферном давлении. Показано, что радиальная кольцевая струя выступает своего рода «преградой» для основного потока. Рост параметра вдува приводит к увеличению глубины проникновения вторичной струи в основной поток. При этом смешение потоков происходит не в пристенной зоне у защищаемой поверхности, а на некотором удалении от нее ( $y/R \geq 0.15$ ). Максимальный уровень аксиальных турбулентных пульсаций получен в слое смешения основного потока и радиальной кольцевой струи. Максимум интенсивности продольных пульсаций расположен в пристенной зоне трубы и его точка смещается в сторону оси трубы при проникновении вторичной струи в основной поток для области рециркуляции течения. Наибольшие величины поперечных пульсаций наблюдаются в зоне натекания основного потока на поперечную струю и в области вдува поперечной радиальной струи.

Для проверки достоверности разработанной математической модели были выполнены сопоставления с данными измерений других авторов для однофазной (воздушного) и газочапельной пристенной завес, вдуваемых через отверстия в защищаемой поверхности под углом к основному однофазному потоку. Показано, хорошее согласие с данными измерений для одно- и двухфазной пристенных струй по величине тепловой эффективности (максимальное отличие не превышает 15%).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант номер 24-29-00038).

### Литература

- [1] Pakhomov M.A. RANS simulation of heat transfer in a mist turbulent flow over an obstacle // Int. J. Thermal Sci. – 2024. – v. 199. – 108913.
- [2] Терехов В.И., Мшвидобадзе Ю.М. Аэродинамика и сопротивление цилиндрического канала при вдуве в него радиальной струи // Теплофизика и аэромеханика. – 2000. – т. 7, № 1. – с. 69–77.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 3D-ПЕЧАТНЫХ ГИБРИДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ КОРОТКИМ И НЕПРЕРЫВНЫМ ВОЛОКНОМ

Пепеляев А.А.<sup>1</sup>, Лобов Е.С.<sup>1</sup>, Ташкинов М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

[paa@pstu.ru](mailto:paa@pstu.ru), [ESLobov@pstu.ru](mailto:ESLobov@pstu.ru), [m.tashkinov@pstu.ru](mailto:m.tashkinov@pstu.ru)

В данной работе изучалось влияние параметров печати и армирующих элементов в виде короткого и непрерывного волокна на механические свойства 3D-печатных полимерных композитов, изготовленные по технологии послойного наплавления филамента. Исследовались композиты с матрицей из следующих термопластов: акрилонитрилбутадиенстирол, полиэтилентерефталат-гликоль и полиамид 12. В качестве армирующих элементов использованы стеклянные и углеродные короткие волокна, а также непрерывные углеродные волокна, с помощью которых можно повысить прочность [1], [2].

Для исследования механических отклика в случае одноосного статического растяжения применялся стандарт ISO 527 – 2:2012. По результатам экспериментов установлено, что при использовании сопла большего диаметра предел прочности изделия повышается. Исследуя влияние угла укладки материала на механические свойства, были рассмотрены углы 0° и 90° относительно растягивающего усилия. Анализ показал, что укладка в направлении растягивающего усилия (0°) более эффективна: для неармированного материала эффективность достигает 1.5 раз, а для армированного короткими волокнами — 2 раза.

Исследовалось влияние объемной доли непрерывного армирующего элемента на механические свойства полимерного композита с различными матрицами. Результаты показали, что образцы с разной матрицей имеют разные уровни прироста прочностных характеристик при армировании. PA12 продемонстрировал наибольший прирост, в то время как ABS — наименьший (см. рисунок 1). Линейное увеличение процентного содержания армирующего материала приводит к нелинейному росту прочностных свойств (рисунок 2). ABS показал наименьшие прочностные характеристики, что можно объяснить низкой адгезией между матрицей и наполнителем, снижающей общую прочность изделия.

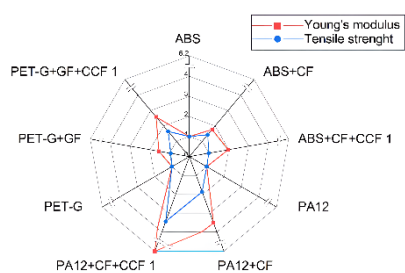


Рисунок 1 – Нормированные свойства

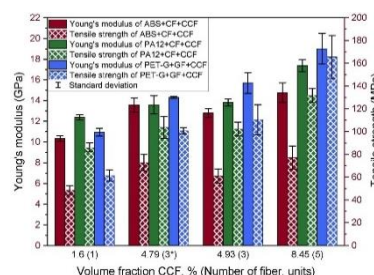


Рисунок 2 – Механические отклик

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10350).

### Литература

- [1] A. Pepeliaev, E. Lobov, I. Vindokurov, and M. Tashkinov, 'Comparison of mechanical properties of 3D-printed ABS, PA12 and PET-G reinforced with short fiber', *Procedia Struct. Integr.*, vol. 61, no. 2023, pp. 224–231, 2024, doi: 10.1016/j.prostr.2024.06.029.
- [2] E. Lobov, I. Vindokurov, and M. Tashkinov, 'Mechanical Properties and Performance of 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene Reinforced with Carbon, Glass and Basalt Short Fibers', *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 8, 2024, doi: 10.3390/polym16081106.

## ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЕ ВРЕМЕННЫЕ РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ЖЕСТКИХ СИСТЕМ С НЕДИАГОНАЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТЬЮ

Пермякова Э.В.<sup>1</sup>, Голдобин Д.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
[evelina.v.permyakova@gmail.com](mailto:evelina.v.permyakova@gmail.com), [Denis.Goldobin@gmail.com](mailto:Denis.Goldobin@gmail.com)

Методы экспоненциальных временных разностей являются мощным инструментом для высокопроизводительного численного моделирования вычислительно сложных задач в физике конденсированного состояния, гидродинамике, химической и биологической физике, где математические модели часто обладают быстрыми колебательными или затухающими модами — являются жесткими системами. Практическая реализация этих методов для систем с недиагональной линейной частью уравнений осложняется невозможностью аналитического вычисления экспоненты недиагонального линейного оператора. В таком случае коэффициенты экспоненциальной временной разностной (ЭВР) схемы также не могут быть вычислены аналитически.

В данной работе рассматривается подход к вычислению коэффициентов схем ЭВР высокого порядка для систем с недиагональной линейной частью. В этом подходе коэффициенты схемы вычисляются посредством численного интегрирования вспомогательных задач с помощью стандартного метода предиктор-корректор, с очень малым шагом по времени  $\tau_1$ , обеспечивающим численную устойчивость на коротком временном интервале — шаге по времени  $\tau$  схемы ЭВР. Основная концепция решения была предложена в работе [1], а здесь мы развиваем и применяем тот же подход к схемам типа Рунге-Кутты [2], но более высокого (3-го и 4-го) порядка [3].

Рассматривается численное моделирование нескольких версий уравнений в частных производных в дискретном пространстве: уравнения Кана-Хилларда и уравнения Мэтьюса-Кокса. Исследуется точность и вычислительная производительность метода.

Для технической реализации предлагаемого подхода достаточно самых простых базовых знаний из линейной алгебры и тензорного анализа.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124021600038-9.

### Литература

- [1] Permyakova E. V., Goldobin D. S. Exponential time differencing for stiff systems with nondiagonal linear part // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2020. – Vol. 61, № 7. – P. 180-190.
- [2] Cox S. M., Matthews P. C. Exponential time differencing for stiff systems Journal of Computational Physics. – 2002. – Vol. 176, № 2. – P. 430-455.
- [3] Permyakova E. V., Goldobin D. S. High-Order Schemes of Exponential Time Differencing for Stiff Systems with Nondiagonal Linear Part // Journal of Computational Physics. – 2025. – Vol. 520. – 113493.

## КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ НЕСООТВЕТСТВИЯ В СИММЕТРИЧНОМ ДВУХСЛОЙНОМ ЦИЛИНДРЕ

Петров Д.А.<sup>1</sup>, Гуткин М.Ю.<sup>1-3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>3</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург

[petrov\\_d\\_a@ipme.ru](mailto:petrov_d_a@ipme.ru)

Кристаллические композитные нанопроволоки представляют широкий класс низкоразмерных гетеро-структур [1]. Тонкая настройка параметров таких систем (геометрия, состав и пр.) позволяет получать уникальные и хорошо контролируемые функциональные свойства. Одной из главных проблем в этом направлении является релаксация напряжений несоответствия (НН), возникающих из-за несоответствия параметров решетки используемых материалов. В частности, релаксация НН обычно приводит к образованию дислокаций несоответствия (ДН), ведущих к ухудшению свойств или невозможности использования таких гетероструктур в практических приложениях. Поэтому чрезвычайно актуальна задача определения критических значений параметров системы, при которых начинается релаксация НН. Эффективным подходом к решению этой проблемы является использование энергетического критерия с привлечением линейной теории упругости и теории дефектов. В настоящем докладе данный подход применен к упруго-изотропному симметричному двухслойному цилиндру с несоответствием параметров решетки (модель двухслойной нанопроволоки), а именно, рассматривается механизм релаксации путем образования на границе раздела прямолинейной краевой ДН, соосной или перпендикулярной цилиндру.

Изменение энергии системы при введении ДН состоит из двух слагаемых: собственной энергии ДН и энергии ее упругого взаимодействия с НН. Собственная энергия соосной дислокации известна [2], а для поперечной был проведен численный расчет с использованием конечно-элементного моделирования. (Для валидации метода использовались аналитические решения для дислокации в шаре [3] и в срединной плоскости пластины [4]). Для вычисления энергии взаимодействия было получено аналитическое решение для НН в симметричном двухслойном цилиндре, что позволило получить выражение для энергии взаимодействия в замкнутом виде. Показано, что при типичных значениях коэффициента Пуассона критические значения основных параметров системы для поперечной и продольной ДН в двухслойном цилиндре отличаются незначительно и лежат между значениями для пластины толщиной, равной диаметру цилиндра, и шара того же диаметра. Например, критический радиус начала релаксации в цилиндре примерно на 30% меньше, чем в шаре, и на 20% больше, чем в пластине.

### Литература

- [1] Романов А.Е., Колесникова А.Л., Гуткин М.Ю. Внутренние напряжения и структурные дефекты в нанопроволоках // Прикладная математика и механика. – 2022. – т. 86, № 4. – с. 527-550.
- [2] Хирт Д., Лоте И. Теория дислокаций – Москва, Атомиздат, 1972. – 600 с.
- [3] Петров Д.А., Гуткин М.Ю., Колесникова А.Л., Романов А.Е., Краевая дислокация в упругом шаре // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике : Сборник тезисов докладов. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года. – Санкт-Петербург, ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – т. 4. – с. 503-505.
- [4] Gutkin M. Yu., Romanov A. E. Straight edge dislocations in a thin two-phase plate. II. Impurity-vacancy polarization of plate, interaction of a dislocation with interface and free surfaces // Phys. stat. sol. (a). – 1992. – Vol. 129, No. 2. – p. 363-377.

## ГРАНИЦЫ СКВОЗНОЙ ЭЛЕКТРОМИГРАЦИИ ДЛЯ ДИССОЦИАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

Петухов М.И., Демин В.А.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*  
[demin@psu.ru](mailto:demin@psu.ru)

В работе представлены результаты численного моделирования процесса прохождения постоянного электрического тока через жидкий диэлектрик, находящийся между двумя плоскими металлическими электродами. В используемой физико-математической модели учитывается влияние пространственной неоднородности концентрации ионных пар и, соответственно, степени диссоциации на электромиграционные процессы. Поведение ионов проводимости и электронейтральных ионных пар описывается при помощи одномерных кинетических уравнений переноса [1-3]. Помимо этого, в математической постановке присутствует уравнение Пуассона, связывающее концентрации ионов и напряженность электрического поля. Для решения системы уравнений значения концентраций на границах расчетной области задавались при помощи условий третьего рода, которые связывают диффузионный и электромиграционный потоки с заданной электропроводностью. Такие граничные условия позволяют смоделировать замкнутый окислительно-восстановительный процесс в диэлектрике [4].

Решение краевой задачи позволяет проанализировать процесс формирования стационарных профилей концентрации и электрического потенциала между электродами для заданной разности потенциалов и построить вольт-амперные характеристики исследуемого жидкого диэлектрика, близкого по свойствам к расплаву бензойной кислоты. Данные вольт-амперные характеристики разделяются на несколько участков. В области малых напряжений имеется линейный участок, переходящий в степенной рост силы тока в зависимости от напряжения. Этому участку соответствует накопление ионов вблизи электродов и обеднение примесями межэлектродного пространства. При этом миграционного тока в межэлектродном промежутке нет. Ток в рабочей области поддерживается за счет диссоциации и рекомбинации ионов вблизи поверхностей электродов. Далее следует постепенный выход на предельный в рамках физико-математической модели режим электропроводности, который заключается в появлении между электродами поля, достаточного для организации крупномасштабной миграции ионов. Таким образом, в вольт-амперной характеристике появляется линейная асимптотика, но в области больших напряжений. Угол наклона в ней определяется значением электропроводности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края (проект № 24-29-20277)

### Литература

- [1] Pontiga F., Castellanos A. Physical mechanisms of instability in a liquid layer subjected to an electric field and a thermal gradient // *Physics of fluids*, 6, 1684, 1994.
- [2] Melnikov S. Ion transport and process of water dissociation in electromembrane system with bipolar membrane: modelling of symmetrical case // *Membranes*, 13, 47, 2023.
- [3] Schiffbauer J., Ganchenko N., Ganchenko G., Demekhin E. Overlimiting current due to electro-diffusive amplification of the second Wien effect at a cation-anion bipolar membrane junction // *Biomicrofluidics*, 12, 064107, 2018.
- [4] Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей – Москва, 1979. – 320 с.

## ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛИ ПРИ НАЛИЧИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ: УЧЁТ ВЫДЕРЖЕК И ЧАСТОТЫ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Петухов Д.С., Келлер И.Э.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[petuhovds@mail.ru](mailto:petuhovds@mail.ru), [kie@icmm.ru](mailto:kie@icmm.ru)

Создание сжимающих остаточных напряжений на поверхности ответственных деталей авиационного двигателя повсеместно используется для увеличения их усталостной долговечности. Эти напряжения препятствуют процессам возникновения усталостных трещин с поверхности, перенося очаг разрушения вглубь материала. При таком сценарии, усталостное разрушение развивается по другим законам. В частности, точки диаграммы Вёлера сдвигаются вправо по сравнению со случаем обычной споверхностной усталостной трещины [1]. Технология лазерной проковки позволяет создавать особенно глубокий слой сжимающих остаточных напряжений [2].

Методики расчета усталостного ресурса с учетом поверхностных остаточных напряжений обсуждаются в научной литературе, но не являются общепринятыми в конструкторских организациях. При этом зачастую остаются без внимания нерегулярность нагружения, являющаяся характерной для полётных циклов. А так же многоосность и непропорциональность нагружения, возникающие при наложении постоянных во времени остаточных напряжений на основную, переменную во времени, нагрузку. Удобным способом описать подобные эффекты является эволюционный тип модели, позволяющей, имея историю изменения тензора напряжений, рассчитать накопленную поврежденность. Такие модели обычно записываются в форме

$$\dot{D} = F(\sigma, \dots)$$

, где  $D$  есть параметр поврежденности,  $F$  - некоторый функционал, зависящий от текущего напряжённого состояния, его истории и внутренних переменных процесса. В данной работе рассматривается несвязанная эволюционная модель накопления поврежденности, построенная на основе модели [3].

Наличие выдержек и частота нагружения значительно влияют на усталостную прочность [4]. Для учёта наличия выдержек в полётном цикле, а так же различия, характерных для него частот и частот усталостных испытаний, эволюционная модель дополнительно модифицирована. Исследован эффект учёта этих явлений на усталостную прочность на примере расчёта поверхностно упрочнённой детали авиадвигателя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 24-29-20148.

### Литература

- [1] Shiozawa K., Lu L., Ishihara S. S-N curve characteristics and subsurface crack initiation behaviour in ultra-longlife fatigue of a high carbon-chromium bearing steel // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2002. – Vol. 24. – p. 781–790.
- [2] Н. Кашаев, О. А. Плехов, Е. А. Гачегова и др. Влияние лазерной ударной проковки на мало- и многоцикловую усталость титанового сплава OT4-0 // *Прикладная механика и техническая физика.* – 2022. – т. 63, № 2. – с. 182–191.
- [3] Ottosen N. S., Stenström R., Ristinmaa M. Continuum approach to high-cycle fatigue modeling // *Int. J. Fatigue.* – 2008. – Vol. 30, № 6. – p. 996–1006.
- [4] Кузьменко В.А., Матохнюк Л.Е., Писаренко Г.Г. и др. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения – Киев, 1979. – 336 с.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СКВАЖИНЕ С ПРИЗАБОЙНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Пинягин Д.С.<sup>1</sup>, Труфанова Н.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[pinyaginds@gmail.com](mailto:pinyaginds@gmail.com), [ktei@pstu.ru](mailto:ktei@pstu.ru)

В настоящее время в нефтедобывающей отрасли в связи с истощением запасов обычной, легко извлекаемой нефти, остро стоит вопрос о добыче высоковязкой нефти [1–3]. Для решения этой задачи применяются различные эффективные методы [4–5]. Одним из них является использование электрического нагревателя в призабойной зоне скважины, который располагается перед электрическим центробежным насосом. Нагреватель снижает вязкость нефти, обеспечивая её бесперебойное поступление в насос и перекачку.

В данной работе проведено сравнительное исследование влияния конструкции насосно-компрессорных труб (НКТ) с отверстиями диаметром 10 мм и продольными щелями на процессы теплопереноса в скважине. Особое внимание уделено трехмерной математической модели процесса теплопереноса в скважине с призабойным нагревателем для высоковязкой нефти. Модель включает турбулентные и ламинарные режимы течения нефти.

Скважина моделируется на продольном сечении длиной 10 метров, состоящем из насосно-компрессорной трубы и обсадной колонны. Нагреватель цилиндрической формы расположен над забоем скважины. Для решения поставленной задачи использовался метод конечных объемов, реализуемый в программном продукте Fluent, а для построения геометрии элементарного конечного объема и создания расчетной сетки — программа MESH. В результате получены поля скоростей, вязкости и температур, а также распределения скоростей, вязкости и температур по сечению НКТ для разных конструкций: с отверстиями и продольными щелями.

Исследование показало, что использование НКТ с отверстиями позволяет более равномерно распределять температуру в НКТ, что снижает вязкость нефти перед поступлением в электрический центробежный насос способствует повышению эффективности работы скважины. Полученные результаты предоставляют базу для выбора оптимальной конструкции НКТ, что позволит существенно сократить материальные затраты при разработке месторождений высоковязкой нефти.

### Литература

- [1] Рошин П. В., Зиновьев А.М., Рязанов А.А., Соболева Е.И., Никитин А.В., Мурзаханов А.Р. Повышение эффективности добычи высоковязкой нефти с использованием реагентов-растворителей: лабораторные испытания и внедрение на производстве//Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13. – №. 2. – С. 21.
- [2] Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Закономерности территориального размещения и физико-химические свойства нефтей с высоким содержанием асфальтенов и смол // Геология нефти и газа. – 2022. – № 1. – С. 95–108.
- [3] Гиляев Г.Г., Афанасьев И.С., Павлов В.А., Саляев В.В., Стрельцов Ф.С., Хамитов И.Г. Начало нового этапа в освоении месторождений высоковязких нефтей и природных битумов в России // Нефтяное хозяйство. - 2011. - № 6. - С. 6-9.
- [4] Халикова Д. А., Петров С. М., Башкирцева Н. Ю. Обзор перспективных технологий переработки тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов// Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – С.217–220.
- [5] Хамидоллаев Д. Т., Садакбаева Д. Б. Методы перекачки высоковязких нефтей// International Scientific Review. – 2015.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ 3D-ПЕЧАТНЫХ СКАФФОЛДОВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Пирогова Ю.В.<sup>1</sup>, Ташкинов М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[yu.pirogova@pstu.ru](mailto:yu.pirogova@pstu.ru), [m.tashkinov@pstu.ru](mailto:m.tashkinov@pstu.ru)

Ежегодно более чем у миллионов людей диагностируют неизлечимые поражения костной ткани, требующие внешнего вмешательства. В качестве решения проблем повреждения структуры костной ткани могут быть применены биосовместимые имплантаты. Современные подходы к проектированию, связанные с разработкой решетчатых механических метаматериалов, значительно расширяют возможности создания таких структур [1]. Технологии аддитивного производства позволяют воссоздать внутреннюю архитектуру таких объектов с использованием биосовместимых материалов.

В данном исследовании рассмотрен вопрос оптимального дизайна скаффолдов, предназначенного для регенерации трабекулярной костной ткани. Для этого были рассмотрены различные принципы создания трехмерных решетчатых структур, таких как периодические структуры, основанные на заданных элементарных ячейках и аналитическом определении трехмерных поверхностей; случайные структуры, основанные на диаграмме Вороного, а также на алгоритме разделения фаз с использованием случайных гауссовых полей. Проведена комплексная оценка сходства искусственно созданных скаффолдов с трехмерными фрагментами компьютерной томографии трабекулярной кости.

Были оценены механические свойства, морфологические параметры, распределение статических напряжений и деформаций, а также развитие процесса накопления повреждений в структурах. Основываясь на данных о деформации внутренних структурных элементов, были установлены преимущества природных костных структур перед искусственными периодическими решетчатыми структурами с точки зрения прочности на сжатие. Для дальнейшей оптимизации в соответствии со структурой трабекулярной кости были выделены две перспективные модели: периодическая, основанная на вариации гироида и случайная, основанная на тесселяции Вороного с использованием алгоритма релаксации Ллойда. Модель двунепрерывной структуры, созданной на основе алгоритма разделения фаз с использованием случайных гауссовых полей, также заслуживает внимания, поскольку ее морфометрические параметры почти совпадают с параметрами трабекулярных структур; тем не менее, с точки зрения прочности и жесткости она уступает другим рассмотренным структурам.

Полученные данные будут использованы для выполнения оптимизации как механических свойств метаматериалов, так и их морфологических характеристик. Оптимальные параметры могут быть выбраны для требуемой комбинации механического отклика, морфологических параметров и физических свойств структуры путем проведения параметрических исследований для искусственно созданных структур на основе математических формулировок или стохастических генераторов.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2024-0013).

### Литература

- [1] J. Zhang, M. Xu, N. Zhang, T. Wang, Y. Zhang, Z. Yang, Q. Wang, Advances and Applications of 4D-Printed High-Strength Shape Memory Polymers //Addit. Manuf. Front. -2024.



## ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

Подкина Н.С.<sup>1</sup>, Кузнецова Е.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[podkina\\_ns@mail.ru](mailto:podkina_ns@mail.ru), [mellen75@mail.ru](mailto:mellen75@mail.ru)

Терморасширенный графит (ТРГ) и детали на его основе широко применяются в различных отраслях промышленности, в качестве уплотнительных элементов в соединениях аэрокосмической техники, в атомной энергетике, где необходимо обеспечить надежность и качество фланцевых соединений. В литературе мало описаны процессы и поведение ТРГ при термообработке [1], поэтому, проведение ряда экспериментов для исследования влияния термообработки полуфабриката (материалов ТРГ) на их свойства является актуальной задачей.

Для проведения испытаний было подобрано несколько режимов термообработки исходя из условия, что температура термообработки должна быть выше температуры расширения или равна ей. Помимо цели улучшить механические характеристики ТРГ в данном эксперименте была поставлена цель снизить количество серы общей за счет дополнительного «дорасширения» ТРГ, раскрытия закрытых пор и выхода газов, содержащих оставшиеся соединения серы. Были отобраны листы материалов ТРГ определенной толщины с послойной укладкой через специальные проставки из спрессованного ТРГ. Это было сделано для создания разной степени «омываемости» средой. Такие «стопки» листов были термообработаны на разных режимах.

По результатам испытаний количественный химический анализ (КХА) показал, что дополнительная «очистка» материала ТРГ с помощью термообработки позволяет снизить количество содержащейся серы во всех образцах. Содержание хлорид-ионов в исходном материале достаточно низкое, однако, прослеживается тенденция к уменьшению количества при термообработке. Термообработка позволяет снизить массовую долю золы при прокаливании материала ТРГ, т.е. количество примесей в материале действительно снижается. Далее проводились испытания по определению механических характеристик по методикам, описанным в ГОСТ 34708 [2] и в СТО [3]. Анализ результатов показал, что очевидно прослеживается зависимость значений предела прочности при растяжении и предела прочности при сжатии, полученных на одном и том же материале с разницей лишь в наличии термообработки. Для проведения испытаний по определению скорости утечки были отобраны образцы, представляющие наибольший интерес – образцы с наименьшим содержанием серы после термообработки. При этом в некоторых режимах наблюдалось увеличение скоростей утечки газовой среды, что является отрицательным результатом.

Таким образом, по результатам испытаний для случая ужесточения требований к химическому составу ТРГ, выбраны оптимальные режимы термообработки материалов ТРГ.

### Литература

- [1] Влияние термообработки по давлением на структуру слоистых композитов NI/AL / М.И. Карпов, В.П. Коржов, В.М. Кийко, Д.В. Прохоров, А.Н. Толстун // Перспективные материалы. – 2011. – № 13. – С. 704-712.
- [2] ГОСТ 34708 – 2021 Арматура трубопроводная. Уплотнительные материалы на основе терморасширенного графита. Общие технические условия. – Введ.2021-12-01. – М.: Стандартинформ, 2021. – 56 с.
- [3] СТО 24.3-93978201-2020 Материалы и уплотнения из терморасширенного графита и других безасбестовых материалов. Методики механических испытаний. – Пермь : Силур, 2021. – 50 с.

## ИЗМЕРЕНИЕ ИЗВИЛИСТОСТИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИФФУЗИИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО КРАСИТЕЛЯ В ЖИДКОСТИ

Полежаев Д.А., Терёхина А.В.

Пермский государственный гуманитарно - педагогический университет, Пермь  
[polezhaev@pspu.ru](mailto:polezhaev@pspu.ru), [teryokhina\\_av@pspu.ru](mailto:teryokhina_av@pspu.ru)

Экспериментально измерена извилистость пористой среды с помощью техники, основанной на вычислении коэффициента молекулярной диффузии растворенного вещества в свободной жидкости и коэффициента диффузии в жидкости, насыщающей пористую среду.

Траектории движения молекул диффундирующего вещества в пористой среде отличаются от траекторий движения молекул в свободной жидкости из-за необходимости огибать элементы скелета пористой среды, поэтому коэффициент диффузии  $D_p$  растворенного вещества в жидкости, заполняющей пористую среду, меньше коэффициента молекулярной диффузии  $D_m$ . Извилистость может быть вычислена как отношение коэффициента молекулярной диффузии  $D_m$  к коэффициенту диффузии  $D_p$  в жидкости, насыщающей пористую среду.

Эксперименты проводятся с двумя моделями пористой среды. Первая модель представляет собой узкий прямоугольный канал, заполненный цилиндрами таким образом, что каждая тройка соседних цилиндров образует равносторонний треугольник с вершинами в их центрах. Вторая модель пористой среды представляет собой заполненный параллелепипедами прямоугольный канал, при этом расстояние между параллельными стенками соседних параллелепипедов одинаковое. Цилиндры и параллелепипеды расположены так, что их оси перпендикулярны широким стенкам канала, а высота равна толщине канала.

В экспериментах канал наполовину заполняется водой с растворенным в ней флуоресцентным красителем Родамином Б, наполовину – чистой водой. С помощью лазерно-индуцированной флуоресценции водного раствора Родамина Б определяется ширина диффузионной зоны около границы двух жидкостей, внутри которой интенсивность флуоресцентного излучения уменьшается от максимального значения до нуля. Измеряя ширину диффузионной зоны в различные моменты времени, можно вычислить коэффициент диффузии  $D_m$  и  $D_p$  и, следовательно, извилистость.

Извилистость пористой среды зависит от формы скелета и ее пористости. В настоящих экспериментах варьируется диаметр цилиндров или расстояние между параллелепипедами и, как следствие, пористость каждой модели пористой среды. Измерение коэффициента  $D_p$  при различных значениях пористости позволяет получить экспериментальные зависимости извилистости от пористости и сравнить их с известными теоретическими моделями извилистости двумерных пористых сред [1].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-21-00311).

### Литература

[1] Ghanbarian B. et al. Tortuosity in porous media: a critical review //Soil science society of America journal. – 2013. – т. 77. – №. 5. – с. 1461-1477.

## ДИНАМИКА ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПЕРЕХОДОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ В НАКЛОНЯЕМОМ КВАДРАТЕ

Полудницин А.Н.<sup>1</sup>, Шарифулин А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

[Panam.48@mail.ru](mailto:Panam.48@mail.ru), [shariulin@bk.ru](mailto:shariulin@bk.ru)

Тепловая конвекция воды в замкнутых наклоняемых прямоугольных полостях представляет интерес в связи с тем, что подобные емкости являются элементами большого количества технических устройств. Их ориентация может плавно или ступенчато меняться, при этом в жидкости, заполняющей объем, конвективные течения могут претерпевать скачкообразные изменения.

В отсутствии наклона полости при подогреве снизу возможно состояние механического равновесия. Известно, что состояние механического равновесия, при превышении критического значения числа Релея, равного 5011 [1] мягким образом сменяется одним из двух надкритических крупномасштабных валовых стационарных течений. В работе [2], выполненной для воздуха, наклон при малых значениях числа Рэлея приводит к формированию нормального вихря, с направлением циркуляции, совпадающим с направлением угла наклона полости. При числах Рэлея, превышающих критическое значение, плавное изменение наклона полости позволяет сохранить направление вращения вала при переходе угла наклона через нулевое значение, которое существует до некоторого критического угла. При превышении критического угла наклона происходит скачкообразное изменение вращения вала на обратное.

В настоящей работе приводятся результаты исследования режимов тепловой конвекции воды ( $Pr=7$ ) в наклоняемой квадратной полости. Численно конечно-разностным методом получены бифуркационные диаграммы и бифуркационная кривая. Показано, что картина гистерезисных переходов между стационарными состояниями для воды существенно усложняется. Гистерезисные переходы осуществляются многоступенчатым образом между одновихревыми и двухвихревыми состояниями с различными направлениями циркуляции.

### Литература

[1] Mizushima, J. Sequential transitions of the thermal convection in a square cavity / J. Mizushima, T. Adachi. // J. Physical Society of Japan. – 1997. – Vol. 66, № 1. – P. 79-90.

[2] Шарифулин А. Н., Полудницин А. Н. Экспериментальное определение пределов существования аномального конвективного течения в наклоняемом кубе // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – Т. 55. – № 3 (325). – С. 103-112.

## ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ НАСОСА БЕГУЩЕГО ПОЛЯ

Полуянов А.О., Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[poluyanov.a@icmm.ru](mailto:poluyanov.a@icmm.ru), [mad@icmm.ru](mailto:mad@icmm.ru), [kiv@icmm.ru](mailto:kiv@icmm.ru)

Работа посвящена экспериментальному исследованию течения электропроводной среды в коаксиальном канале электромагнитного насоса. В настоящее время широкое распространение в атомной промышленности и металлургии получили индукционные насосы бегущего поля [1]. Принцип действия насоса заключается в том, что в электропроводной среде, под действием переменного магнитного поля, генерируется электрический ток. Электрический ток, взаимодействуя с собственным магнитным полем, порождает электромагнитную силу, генерирующую направленное течение среды. В производственных процессах широко применяются электромагнитные насосы бегущего поля, в которых жидкий металл протекает в щелевом пространстве между трубами цилиндрической формы различного диаметра [2]. Одним из преимуществ такой конфигурации является существенное подавление возвратного течения жидкого металла. Основной частью разработок для новых технологических установок является математическое моделирование и эксперименты с низкотемпературными сплавами, вместо металлов, применяющихся на реальном производстве – алюминия, натрия, и других агрессивных и опасных металлов в жидком состоянии. Целью работы является исследование гидродинамических характеристик течения жидкого металла в щелевом канале насоса бегущего поля.

Экспериментальные исследования выполнены на галлиевом контуре. Контур состоит из вакуумной и газовой системы для заполнения контура жидким металлом, системы охлаждения, расширительной емкости и индукционного электромагнитного насоса. Галлиевый контур заполнен эвтектическим галлиевым сплавом [3], находящимся в жидком состоянии при комнатной температуре. Для измерения скорости течения использовался ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА) и кондукционный датчик скорости (КДС). Показания контура с помощью платы сбора данных «National Instruments» передаются на компьютер и обрабатываются в системе «LabView». Обработка результатов измерений, полученных с помощью УДА и КДС, проводилась в программных пакетах Matlab и Python. По результатам экспериментов получены пульсационные и интегральные характеристики течения. Результаты необходимы для разработки и совершенствования электромагнитных насосов бегущего поля.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка электромагнитных насосов, реализующих транзитные и спиральные течения жидких металлов в щелевых и цилиндрических каналах устройств металлургии и атомной промышленности» № СЭД-26-08-08-35 от 29.01.2024 г.*

### Литература

- [1] Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I. Electrovortex centrifugal pump // Magnetohydrodynamics. 2016. Vol. 52. P. 25-34.
- [2] Козлов Ф.А., Иваненко В.Н. Натрий – теплоноситель АЭС с быстрыми реакторами // Атомная энергия. 1996. Т. 80, № 5. С. 337-345.
- [3] Dobosz A., Plevachuk Y., Sklyarchuk V., et al. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy. Fluid Phase Equilibria, 2018, V. 465, p. 1-9.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТЕЧЕНИЯХ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Полюянов А.О., Колесниченко И.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[poluyanov.a@icmm.ru](mailto:poluyanov.a@icmm.ru), [kiv@icmm.ru](mailto:kiv@icmm.ru)

Актуальность исследования процессов, происходящих в жидких металлах, обусловлена требованиями по усовершенствованию металлургических технологий. Жидкий металл рассматривается как наилучший теплоноситель для систем охлаждения атомных реакторов на быстрых нейтронах и разрабатываемых термоядерных энергетических установок. Проведение физических экспериментов в лабораторных условиях с наиболее востребованными в промышленности металлами осложняется химической агрессивностью и высокими температурами в жидком состоянии. Такими металлами являются натрий, магний, алюминий, и их сплавы. Так как металлы в жидком состоянии являются хорошими проводниками электрического тока, поэтому процесс течения может быть создан электромагнитными силами.

В работе исследуется течение, генерируемое переменным магнитным полем. Поле порождает вихревой ток в среде, и, как следствие, электромагнитные силы, направленные от периферии к центру ячейки. В физике плазмы эта конфигурация известна как «азимутальный пинч» [1]. В жидкометаллических системах описанная конфигурация является важнейшим составляющим элементом электромагнитных устройств, таких как индукционные печи, насосы [2] и перемешиватели [3].

Работа посвящена экспериментальному и численному исследованию пульсаций течения жидкого металла под действием электромагнитных сил в замкнутом объеме. Цилиндрическая ячейка расположена вертикально. Снаружи ячейки соосно ей расположен короткий соленоид, который подключен к источнику переменного тока. Ячейка заполнена эвтектическим галлиевым сплавом [4], находящимся в жидком состоянии при комнатной температуре. Для измерений скорости течения жидкости использовался ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА). Математическая модель сформулирована на основе уравнений магнитной гидродинамики в электродинамическом приближении. Это позволяет отдельно решать электродинамическую и гидродинамическую части задачи. Численное моделирование проводится в пакете Ansys Emag и Fluent.

Результаты физических экспериментов и численного моделирования показали, что структура среднего течения имеет форму двух торов и пульсирует с течением времени. Выбор диапазона управляющего параметра обусловлен возможностью проведения физических измерений с помощью УДА. С помощью вейвлет-анализа исследуется характер пульсаций течения. На вейвлет-спектрограммах были обнаружены локализованные области в пространстве с различной интенсивностью. Наиболее интенсивные пульсации скорости наблюдаются в области соленоида. Анализ показал, что максимальная амплитуда пульсаций возрастает с увеличением управляющего параметра.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМСС УрО РАН.

### Литература

- [1] Белова И.В., К. В. Брушлинский К.В. // Ж. выч. матем. и матем. физ. 1988. Т. 28. № 1. С. 72.
- [2] Poitout S., Branco P.J.C. // IEEE Transactions on Magnetics. 2006. V. 42. No. 9. P. 2133.
- [3] Колесниченко И.В., Халилов Р.И. // Выч. Мех. спл. сред. 2022. Т. 15. № 4. С. 495
- [4] Dobosz A., Plevachuk Y., Sklyarchuk V., et al. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy. Fluid Phase Equilibria, 2018, V. 465, p. 1-9.

## ПРОДОЛЬНЫЕ МОДЫ РЕЛАКСАЦИИ ВЗВЕШЕННОЙ В ЖИДКОСТИ СУПЕРПАРАМАГНИТНОЙ НАНОЧАСТИЦЫ

Поперечный И.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
[poperechny@icmm.ru](mailto:poperechny@icmm.ru)

Наноразмерные частицы с сильными магнитными свойствами считаются перспективными материалами для применения в медицинской практике. Среди возможных вариантов их использования называют, к примеру, внутриклеточную доставку лекарств и их управляемое высвобождение, трансцитоз, специфическую визуализацию тканей, а также магнитоиндукционную гипертермию [1]. Каждая из указанных технологий предполагает взаимодействие частиц с приложенным к ним магнитным полем. Отклик частиц при этом существенно зависит от типа среды, в которой они диспергированы.

Важной особенностью частиц, взвешенных в жидкости, является наличие механических степеней свободы. Направление их магнитного момента может изменяться не только в результате внутреннего (относительно кристаллографических осей) вращения, но и из-за поворотов самой частицы. Вследствие теплового возбуждения кристаллического «остова» частиц и теплового движения молекул окружающей жидкости каждое из этих вращений является случайным. При этом ориентационные тепловые флуктуации магнитного момента внутри частиц обуславливают наличие у них суперпарамагнитных свойств.

Одной из основных характеристик отклика системы на приложение внешнего поля является динамическая магнитная восприимчивость. Для взвешенных в жидкости суперпарамагнитных частиц её частотная зависимость (без учёта гирационных эффектов) была рассчитана в [2]. В основу рассмотрения было положено полученное в [3] кинетическое уравнение для совместной функции распределения направлений магнитного момента частицы и её оси анизотропии. Оказалось, что без подмагничивания линия поглощения указанных частиц имеет два пика, если энергия анизотропии превышает тепловую, по крайней мере, в несколько раз. Кроме того, включение продольного поля смещения может приводить к появлению дополнительного максимума динамической восприимчивости.

Для последовательного объяснения этих эффектов в настоящей работе выполнен детальный анализ спектральных свойств кинетического оператора, задающего эволюцию функции распределения. Показано, что в безгирационном приближении продольная динамическая магнитная восприимчивость взвешенной в жидкости суперпарамагнитной частицы может быть представлена в виде суммы счётного числа слагаемых дебаевского вида, отвечающих различным релаксационным модам. Рассчитаны характеристики (время релаксации и вес) этих мод при разных соотношениях между энергией анизотропии и тепловой энергией и величинах приложенного к частице продольного подмагничивающего поля. Установлено, что все моды можно разделить на три качественно различных типа, каждому из которых отвечает определённое магнитное состояние «остова» частицы: статистически неравновесное, локально-равновесное и полностью равновесное.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы АААА-А20-120020690030-5.

### Литература

- [1] Кокшаров Ю. А., Губин С. П., Таранов И. В., Хомутов Г. Б., Гуляев Ю. В. // Радиотехника и Электроника – 2022. – Т. 67, № 2. – С. 99–116.
- [2] Poperechny I. S. // Physical Review B – 2023. – V. 107. – Art. no. 064416.
- [3] Степанов В. И., Шлиомис М. И. // Известия АН СССР. Серия Физич. – 1991. – Т. 55, Вып. 6. – с. 1042-1049.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЧНОСТНОГО РАСЧЁТА ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Поспелов Д. Р.<sup>1,2</sup>, Семин М.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Горный институт УрО РАН, г. Пермь

<sup>2</sup>Пермский Государственный Национальный Исследовательский Университет, г. Пермь

[dmitriy-pospelov@bk.ru](mailto:dmitriy-pospelov@bk.ru), [seminma@inbox.ru](mailto:seminma@inbox.ru)

Строительство шахтных стволов в обводнённых и неустойчивых грунтах осуществляется с использованием специальных технологий, таких как искусственное замораживание пород. Прочностной расчёт конструкций из замороженных пород, выполняющих функции гидроизоляции и укрепления стенок строящегося ствола, чаще всего проводится на основе линейного прочностного критерия Мора-Кулона (МК). Однако данный критерий адекватно описывает предельное напряжённое состояние грунтов и пород лишь до определённого значения среднего нормального напряжения. Для различных типов пород это значение может варьироваться в диапазоне от 6 до 12 МПа [1-3].

При замораживании пород на глубину 500 м и более суммарная нагрузка на внешнюю стенку ледопородного ограждения (ЛПО) становится настолько высокой, что среднее нормальное напряжение может превышать нижнюю границу указанного диапазона. Это указывает на то, что критерий МК не всегда корректно учитывает увеличение прочности породы при росте среднего нормального напряжения [4].

Разработка уточнённой методики прочностного расчёта ЛПО требует изучения особенностей разрушения мерзлых пород при высоких значениях среднего нормального напряжения. В литературе описаны несколько нелинейных критериев оценки прочности замороженных пород, содержащих лёд в поровом пространстве. Эти исследования показывают снижение максимальных касательных напряжений с ростом среднего нормального напряжения, что обусловлено таянием и дроблением порового льда. Основными недостатками предложенных критериев являются большое количество эмпирических параметров (4 и более), размытость их физического смысла и отсутствие связи с общепринятыми параметрами (сцепление и угол внутреннего трения), используемыми при анализе прочности замороженных пород при относительно низких средних нормальных напряжениях.

С учётом указанных недостатков в данной работе проводится сравнительный анализ способов функционального описания предельных поверхностей критерия МК для различных типов пород при различных отрицательных температурах. Кроме того, предлагается новая дробно-линейная аппроксимирующая зависимость, описывающая связь между максимальными и минимальными главными напряжениями на предельной поверхности критерия МК.

### Литература

- [1] Yang Y., Gao F., Lai Y. Modified Hoek–Brown criterion for nonlinear strength of frozen soil // Cold Regions Science and Technology. – 2013. – Т. 86. – С. 98-103.
- [2] Wang P. et al. A macro-meso nonlinear strength criterion for frozen soil // Acta Geotechnica. – 2024. – С. 1-18.
- [3] Li Z. et al. Modified statistical damage constitutive model for frozen sand based on nonlinear strength criterion // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2022. – Т. 26. – №. 11. – С. 4467-4477.
- [4] Yuanming L. et al. Strength criterion and elastoplastic constitutive model of frozen silt in generalized plastic mechanics // International Journal of Plasticity. – 2010. – Т. 26. – №. 10. – С. 1461-1484.

## МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРУБКАХ ТОКА ДЛЯ БЫСТРОГО И ВЫСОКОТОЧНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТА

Поташев К.А.<sup>1</sup>, Мазо А.Б.<sup>1</sup>, Баушин В.В.<sup>2</sup>, Мухина М.В.<sup>1</sup>, Салимьянова Д.Р.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань

<sup>2</sup>ООО "ИМПЕЛ СОФТ", Казань

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

[kpotashev@mail.ru](mailto:kpotashev@mail.ru)

Проектирование методов повышения нефтеотдачи пласта на основе численного моделирования фильтрационных течений требует значительных вычислительных ресурсов. Это связано, во-первых, с необходимостью воспроизведения мелкомасштабных гидродинамических эффектов с учетом тонкой геологической структуры пласта. Во-вторых, подбор наилучшего сценария воздействия сводится к оптимизационной задаче, предполагающей большое число решения прямых задач. Наконец, неопределенность исходных данных, характерная для условий проектирования геолого-технических мероприятий, часто приводит к необходимости вероятностного многовариантного моделирования. При использовании традиционных трехмерных моделей фильтрации [1] необходимого уровня детализации (до 0.1 м по вертикали и до 1 м по латерали) даже на небольшом участке воздействия размерность сеток может достигать  $10^6 \cdot 10^8$  элементов. Таким образом, получение высокоточного решения в приемлемые для практических задач сроки становится невозможным. В качестве альтернативы активно развивались одномерные методы линий и трубок тока [2], позволяющиекратно сократить время расчета, однако требующие регулярного перестроения линий тока, чувствительных к изменению структуры течения, что в определенных случаях, наоборот, увеличивает машинное время счета. Авторами настоящей работы предложена модель фильтрации в двумерных фиксированных трубках тока, которая одновременно понижает размерность решаемых задач и отражает изменчивость фильтрационных потоков, на которую направлены методы повышения нефтеотдачи, в вертикальном срезе преимущественно слоистых пластов [3-5]. Модель позволяет сократить время счета на сетках высокого разрешения на 1-2 порядка и выше, при использовании параллельных вычислений, по сравнению с трехмерным моделированием и успешно апробирована на примере ряда задач проектирования геолого-технических мероприятий [3-6], в том числе в условиях неопределенности исходных данных [7].

### Литература

- [1] Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2004. – 416 с.
- [2] Thiele M.R. Modeling Multiphase Flow in Heterogeneous Media Using Streamtubes. PhD dissertation. – Stanford University, Dept. of Petroleum Engineering. – Stanford, CA, October. – 1994. – 217 p.
- [3] Мазо А.Б., Поташев К.А., Баушин В.В., Булыгин Д.В. Расчет полимерного заводнения нефтяного пласта по модели фильтрации с фиксированной трубкой тока // Георесурсы. – 2017. – т. 19, № 1. – с. 15-20.
- [4] Мазо А. Б., Поташев К. А. Суперэлементы. Моделирование разработки нефтяных месторождений: Монография. – М: ИНФРА-М. – 2020. – 220 с.
- [5] Potashev K. A., Mazo A. B. Mathematical Modeling of Oil Reservoir Waterflooding Using Fixed Streamtube at Various Values of Viscosity Ratio // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2021. – V. 42, No. 8. – p. 2023-2029.
- [6] Поташев К. А., Баушин В. В., Мазо А. Б., Рамазанов Р. Г., Шелепов В. В. Проектирование положения изолирующего материала в обводненном слое суперколлектора для пятиточечной схемы заводнения нефтяного пласта // Вестн. Моск. ун-та. Сер.4. Геология. – 2023. – 6. – С. 144-155.
- [7] Salimyanova D. R., Potashev K. A. Numerical Simulation of High-Permeability Waterflooded Sublayer Water Shut-Off under Uncertainty of Its Location in a Petroleum Reservoir // SOCAR Proceedings. – 2023. – no. 4, p. 092-098.



## СПЕКТРАЛЬНЫЙ РАДИУС МАТРИЦ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ КАНА-ХИЛЛАРДА

Прокопьев С.А.<sup>1</sup>, Любимова Т.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИМСС УрО РАН, Пермь

[prokopez.s@icmm.ru](mailto:prokopez.s@icmm.ru), [lyubimovat@mail.ru](mailto:lyubimovat@mail.ru)

Уравнение Кана-Хилларда является основным в теории фазового поля [1]. Изначально эта теория применялась для моделирования фазовых переходов, процессов кристаллизации и плавления, образования зародышей, роста дендритов и переконденсации. Благодаря сочетанию модифицированных уравнений Навье-Стокса и уравнения Кана-Хилларда удалось по-новому подойти к анализу таких классических задач, как неустойчивости Релея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца, вытеснение одной жидкости другой в капиллярах, а также поведение капель при всплытии или погружении.

Теория фазового поля позволяет эффективно исследовать термодинамически неравновесные системы с перемешивающимися компонентами, что приводит к изменению свойств межфазной границы, таких как поверхностное натяжение и капиллярное давление, во времени. Эти изменения, в свою очередь, существенно влияют на характеристики течения и развитие неустойчивостей.

Уравнение Кана-Хилларда при этом является уравнением четвертого порядка в частных производных, что для явных методов накладывает ограничение на шаг по времени намного сильнее, чем для обычного уравнения диффузии Фика силу наличия четвертой производной:  $\tau \sim h^4$  ( $\tau$  – шаг по времени,  $h$  – шаг по пространству). При этом рассматривается модель, в которой конвективное слагаемое не учитывается; в противном случае стабильность системы будет зависеть и от величины конвективного потока. Отметим также, что в теории фазового поля наличие межфазной границы обычно требует высокого уровня пространственного разрешения. Поэтому при применении явных методов для решения уравнения Кана-Хилларда часто возникает необходимость использовать крайне малый шаг интегрирования по времени.

Для неявных же методов матрица системы алгебраических уравнений, которая получается в результате дискретизации исходных уравнений в частных производных, оказывается плохо обусловленной. Фактически для неявной схемы приходится брать шаг по времени, сопоставимый с явной схемой. В текущей работе проведен анализ итерационных решателей на основе методов Якоби и Гаусса-Зейделя, получено явное выражение для спектрального радиуса, зависящего от параметров задачи. На основании полученного выражения предложена модификация исходных уравнений путем добавления фиктивной производной химического потенциала по времени с релаксационным параметром. Добавление релаксационного слагаемого не приводит к некорректным результатам и при этом улучшает обусловленность матрицы системы линейных уравнений, что позволяет проводить вычисления со значительно более грубым временным шагом интегрирования.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы (№ 121031700169-1).

### Литература

[1] Cahn J. W., Hilliard J. E. Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy // J. Chem. Phys. – 1958. т. 28. №. 2. – с. 258-267.

## НАМАГНИЧЕННОСТЬ ТЕКСТУРИРОВАННОГО АНСАМБЛЯ ОБЕЗДВИЖЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ФЕРРОЧАСТИЦ: ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СТАТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Радушнов Д.И.<sup>1</sup>, Елфимова Е.А.<sup>1</sup>, Зверев В.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург  
[dmitry.radushnov@urfu.ru](mailto:dmitry.radushnov@urfu.ru)

Работа посвящена расширению теоретической модели [1], описывающей намагниченность взаимодействующего монодисперсного ансамбля обездвиженных магнитных наночастиц с анизотропной ориентационной структурой, на случай произвольного направления поля. Анизотропия системы формируется путем выстраивания магнитных моментов и осей легкого намагничивания наночастиц вдоль поля полимеризации  $\mathbf{h}^p$  и сохраняется посредством полимеризации магнитной жидкости до отключения поля. Положение частиц, а также ориентация их осей легкого намагничивания, созданная в процессе воздействия поля, остаются неизменными в сформированной полимерной матрице. В отличие от модели [1], в которой рассматривалась параллельная ориентация поля полимеризации и намагничивающего поля  $\mathbf{h}$  ( $\mathbf{h}^p \parallel \mathbf{h}$ ), предложенная в этой работе теория позволяет рассматривать различные ориентации намагничивающего поля  $\hat{\mathbf{h}} = (\sin\beta, 0, \cos\beta)$ , где  $\beta$  – угол между  $\mathbf{h}^p$  и  $\mathbf{h}$ . Построенная теория была протестирована на результатах компьютерного моделирования с использованием метода молекулярной динамики в программном комплексе ESPResSo [2]. На рисунке 1 представлен график намагниченности в зависимости от угла поворота намагничивающего поля  $\mathbf{h}$ , сплошные линии – теория; точки – данные компьютерного моделирования. Из графика видно, что ориентация намагничивающего поля  $\mathbf{h}$ , величина которого описывается параметром Ланжевена  $\alpha$ , существенно сказывается на намагниченности системы. Результаты демонстрируют хорошее согласие между теорией и компьютерным моделированием.

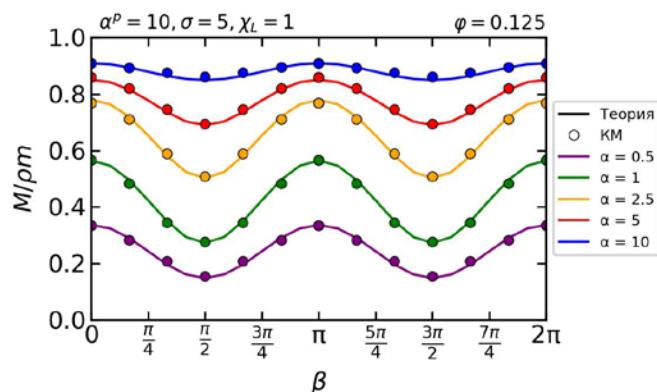


Рисунок 1. График намагниченности ансамбля обездвиженных феррочастиц с концентрацией  $\phi = 0.125$  в зависимости от угла поворота  $\beta$ . Интенсивность поля полимеризации  $\alpha^p = 10$ , параметром магнитной анизотропии  $\sigma = 5$ , восприимчивость Ланжевена  $\chi_L = 1$ . Различные цвета соответствуют разным значениям параметра Ланжевена  $\alpha$  намагничивающего поля; сплошные линии соответствуют теории; точки – данные компьютерного моделирования.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 23-12-00039.

### Литература

- [1] Radushnov D. I., Solovyova A. Y., Elfimova E. A. Structure and magnetization of a magnetoactive ferrocomposite // *Nanoscale*. – 2022. – Т. 14. – №. 29. – С. 10493-10505.  
 [2] Weik F. et al. ESPResSo 4.0—an extensible software package for simulating soft matter systems // *The European Physical Journal Special Topics*. – 2019. – Т. 227. – С. 1789-1816.

## НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В БЕДРЕННОМ КОМПОНЕНТЕ ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА ИЗ УУКМ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ

Разумовский Е.С., Шавшуков В.Е.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

Исследованы процессы повреждаемости в бедренном компоненте эндопротеза тазобедренного сустава (далее - эндопротез), изготовленного из однонаправленного углерод-углеродного композиционного материала (далее – УУКМ) с пиролитической углеродной (ПУ) матрицей. Разработана математическая модель деформирования эндопротеза с учетом процессов повреждаемости УУКМ. Повреждения возможны при перегрузках, которые могут быть вызваны случайными обстоятельствами при передвижении человека. Разработанная модель является синтезом алгоритмической модели, учитывающей неоднородность пироуглеродной матрицы и композита, и инженерной расчетной модели биомеханической системы эндопротез-бедренная кость [1]. Матричный алгоритм решает стохастическую краевую задачу по нахождению мезонапряжений в зернах ПУ с учетом возможных повреждений. Результатом работы этого алгоритма являются плотности распределения вероятностей для мезонапряжений в кристаллитах пироуглерода и свойства повреждающейся матрицы. Результатами вычислений по инженерной модели являются поля макродеформаций и макронапряжений. На каждом шаге нагружения эндопротеза отслеживается состояние матрицы и изменяются эффективные модули УУКМ. Это осуществляется непрерывным обменом данными между двумя алгоритмами, перевычислением свойств композита, являющимися входными данными для инженерной модели. Непрерывное изменение эффективных модулей УУКМ при деформировании заменено ступенчатым изменением. Для этого объем эндопротеза был разбит на области, в которых свойства становились переменными, начиная с некоторого шага нагружения. Области изменения определялись на основе картин распределения полей макродеформаций.

Показано, что разрушение углеродной части протеза начинается с локальных повреждений, которые постепенно захватывают соседние области. Повреждения появляются при нагрузке выше 1740 ньютонов. Максимальная силовая реакция протеза на внешнюю нагрузку равна 2004 ньютона. Деформация протеза на стадии критического снижения несущей способности на 16% превосходит деформацию при штатной нагрузке. Результаты вычислительного эксперимента подтверждают высокую надежность рассмотренного варианта эндопротеза (in vivo проверенную клинической практикой [2]), отсутствие катастрофических резких снижений несущей способности при значительном превышении штатных нагрузок.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2023-0006).

### Литература

- [1] Razumovskii E.S., Shavshukov V.E. A change in the bearing capacity of the hip joint Endoprosthesis as a result of damage to the polycrystalline matrix of the C/C composite // Procedia Structural Integrity. – 2024. – Vol. 65. – p. 191-199. DOI:10.1016/j.prostr.2024.11.030..
- [2] Золкин П.И., Островский В.С. Углеродные материалы в медицине. М.: Металлургиздат, 2014. – 140 с.

## РАСХОД ЖИДКОСТИ ИЗ РЕЗЕРВУАРА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ВДОЛЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Райхер Ю.Л.<sup>1</sup>, Голдобин Д.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
[raikher@icmm.ru](mailto:raikher@icmm.ru), [denis.goldobin@gmail.com](mailto:denis.goldobin@gmail.com)

В 1942 г. Л.Д. Ландау и В.Г. Левич опубликовали решение задачи об увлечении жидкости вертикальной пластиной, вытягиваемой из резервуара, заполненного жидкостью. Первоначально, речь шла о расчёте толщины слоя фотоэмульсии, наносимого таким способом на целлулоидную киноплёнку. С течением времени, интерес к полученному решению лавинообразно вырос, поскольку во многих отраслях актуальность приобрели технологические задачи об автоматизации нанесения разнообразных покрытий – защитных плёнок, лаков или красок – на поверхности достаточно большого размера. Сейчас – это обширное научно-инженерное направление под названием “slot-die-coating” (SDC), см. примеры в [2–5]; что в русском переводе должно звучать как *целевая головка-краска-покрытие* или *целевая экструзия краски*.

Вариант с использованием SDC технологии при горизонтальном расположении покрываемой поверхности гораздо менее популярен. Однако имеются ситуации, где он необходим. Одна из них – создание жидкостного контакта головки дефектоскопа с испытываемой поверхностью при ультразвуковом контроле [6]. При использовании маловязкой контактной жидкости (спирт, вода) её гравитационное стекание является нежелательным эффектом.

В настоящей работе задача Ландау-Левича переформулирована для случая горизонтальной протяжки поверхности под локализованным плоским «пятном» жидкости, ограниченном сверху неподвижной твёрдой поверхностью. То есть, жидкость находится в зазоре, толщина которого много больше толщины уносимой плёнки. Объём «пятна» непрерывно пополняется, точно компенсируя его убыль за счёт слоя, забираемого удаляющейся поверхностью.

Полученное решение имеет отличия от классической задачи. В частности, по очевидным причинам расход приобретает зависимость от толщины зазора, в котором находится контактное «пятно». Для жидкости с параметрами воды дана численная оценка ситуации в случае, когда толщина зазора меньше капиллярной длины.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

### Литература

- [1] Ландау Л.Д., Левич В.Г. Dragging of a liquid by a moving plate // Acta Physicochimica USSR. – 1942. – V. 17. – P. 42–51. Перевод: Ландау Л. Д. Собрание трудов. М.: Наука, 1969. – Т. 1. – С. 412–422.
- [2] Ruschak K.J. Limiting flow in a pre-metered coating device // Chemical Engineering Science. – 1976. – V. 31. – P. 1057–1060.
- [3] Carvalho M.S., Kheshgi H.S. Low-flow limit in slot coating: Theory and experiments // AIChE Journal. – 2000. – V. 46. – P. 1907–1917.
- [4] Chang Y.-R., Lin C.-F., Liu T.-J. Start-up of slot die coating // Polymer Engineering and Science. – 2009. – V. 49. – P. 1158–1167.
- [5] Ding, X. Liu J., Harris T.A.L. A review of the operating limits in slot die coating processes // AIChE Journal. – 2016. – V. 62. – P. 2508–2524.
- [6] Алешин Н., Ремизов А., Дерябин А., Прилуцкий М.А. Методика проведения неразрушающего контроля сварных соединений. 2014. М.: МГТУ им. Баумана.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ МАРТЕНСИТНЫХ ВАРИАНТОВ В СПЛАВЕ ГЕЙСЛЕРА В МАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПОЛЯХ

Роговой А.А., Столбова О.С.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь  
[rogovoy@icmm.ru](mailto:rogovoy@icmm.ru), [sos@icmm.ru](mailto:sos@icmm.ru)

Ферромагнитные сплавы с памятью формы (ФСДФ), например, сплав Гейслера  $Ni_2MnGa$ , обладают уникальной способностью демонстрировать значительную деформацию в мартенситном (низкотемпературном) состоянии за счет переориентации структурных вариантов мартенсита под воздействием умеренного магнитного поля. Варианты, которые имеют выгодную ориентацию относительно приложенного магнитного поля, увеличиваются за счет уменьшения менее благоприятно ориентированных вариантов. Такая переориентация может также инициироваться внешними механическими нагрузками.

Двойниковая структура в мартенситной фазе описывается уравнением совместности Адамара для деформаций, решение которого позволяет определить плоскости скольжения, направления и величину сдвига в кристаллической ячейке материала, приводящие к формированию и исчезновению двойниковой структуры. Процесс переориентации одного варианта мартенсита в другой происходит, когда касательные усилия, возникающие от действия магнитного и/или силового полей на поверхностях сдвига, достигают критического значения, определяемого экспериментально для конкретного материала [1].

Исследован процесс переориентации одного варианта мартенсита в другой, происходящий при приложении внешнего магнитного поля перпендикулярно оси анизотропии (легкой оси намагничивания) монокристалла сплава  $Ni_2MnGa$  и при различных значениях сжимающих усилий, направленных вдоль этой оси. Численный расчет включает два этапа: сначала решается задача магнитостатики, после чего, используя полученные результаты, решается упругая задача. Тензор напряжений представляется в виде суммы симметричной и антисимметричной частей, где последняя зависит исключительно от магнитного поля. Для симметричной части используется определяющее соотношение для анизотропного материала, имеющего одну ось симметрии четвертого порядка и две оси симметрии второго порядка. В результате определены касательные и нормальные составляющие тензора напряжений на плоскостях сдвига в момент переориентации одного варианта мартенсита в другой.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

### Литература

[1] Rogovoy A.A., Stolbova O.S. An approach to describe the twinning and detwinning processes of the martensitic structure in ferromagnetic alloy with shape memory in magnetic and force fields // Mech. Adv. Mater. Struct. – 2024 (online). <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2355627>.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПИТЕЛИЯ В РАМКАХ СТАТИСТИКО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Роготнев А.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[rogotnev.a@icmm.ru](mailto:rogotnev.a@icmm.ru), [nas@icmm.ru](mailto:nas@icmm.ru), [naimark@icmm.ru](mailto:naimark@icmm.ru)

Эпителием называют пласт полярных дифференцированных тесно прилегающих друг к другу клеток, лежащий на базальной мембране, принадлежащий границе внешней или внутренней среды организма и образующий значительную часть желез [1]. Данный живой материал, находящийся далеко от состояния равновесия, проявляет неожиданные физические свойства, например, переход из твердого вещества в жидкое, активная псевдоупругость, экзотические формы вязкоупругости [2]. Наша работа посвящена построению математической модели эпителиальной ткани согласно подходу, описанному в [3]. Модель позволяет описать термодинамические и кинетические свойства эпителия в случае простого сдвига с учетом коллективного поведения ансамбля структурных элементов, в качестве которых берутся общие границы клеток, что образуют данную ткань. Для структурного элемента ткани вводится микроскопический параметр порядка, описывающий ориентацию данного элемента. Осредняя по представительному объему эпителия данный микроскопический параметр, получаем макроскопический параметр порядка, характеризующий деформацию системы. В приближении самосогласованного поля вводится структурный параметр термализации неравновесной системы, отражающий статистическую автомодельность поведения ансамбля общих границ клеток. Предлагается вид свободной энергии и типы автомодельных решений, зависящие от значений данного параметра, являющегося основным фактором, что определяет деформационное поведение системы. Установлено, что при различных значениях структурного параметра возможны различные сценарии деформирования, соответствующие либо устойчивому, либо метастабильному, либо критическому состоянию системы.

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы 124020200116-1.

### Литература

- [1] Красняков И.В., Брацун Д.А., Писмен Л.М. Математическое моделирование роста эпителиальной ткани //Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 439-454.
- [2] Armon S., Bull M.S., Moriel A., Aharoni H., Prakash M. Modeling epithelial tissues as active-elastic sheets reproduce contraction pulses and predict rip resistance //Communications physics. – 2021. – vol. 4, no. 1. – pp. 216:1-9.
- [3] Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения //Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 45–72.

## **ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ**

Романов Д.К., Калугин А.Г.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва  
kalugin@mech.math.msu.su*

Рассматривается задача о распространении прогрессивных поверхностных волн бесконечно малой амплитуды на границе раздела двух вязких несжимаемых тяжелых жидкостей в случае, когда эти среды разделены пленкой поверхностно-активного вещества, вследствие чего коэффициент поверхностного натяжения становится переменным и появляется касательная к границе составляющая силы поверхностного натяжения.

Показано, что в случае коротких волн и близких значений плотностей и коэффициентов вязкости жидкостей, когда гравитационным воздействием можно пренебречь, дисперсионное соотношение распадается на два независимых выражения. Первое связывает комплексную частоту, кинематический коэффициент вязкости и волновое число с коэффициентом поверхностного натяжения, второе - те же величины с модулем упругости пленки. Такое разделение позволяет исследовать зависимость круговой частоты и декремента затухания от волнового числа аналитическим способом при помощи параметрического представления, когда указанные величины выражаются в виде рациональных алгебраических функций от вспомогательного параметра. Для обоих решений параметрическое представление позволяет выделить периодическую и аperiodическую затухающие моды, аналогично известным решениям о поверхностных волнах в вязкой жидкости и определить условия перехода между этими модами.

В работе проведено исследование полученных дисперсионных соотношений, построены графики зависимости круговой частоты и декремента затухания от волнового числа для обоих типов волн.

## **МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОНСТИТУТИВНЫЕ МОДЕЛИ: МОДИФИКАЦИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ**

Романов К.А., Швейкин А.И., Трусов П.В.

<sup>1</sup>*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[k.a.kriv@mail.ru](mailto:k.a.kriv@mail.ru), [shveykin@pstu.ru](mailto:shveykin@pstu.ru), [tpv@matmod.pstu.ac.ru](mailto:tpv@matmod.pstu.ac.ru)

В ходе производства изделий из металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации при гомологических температурах ниже 0.5 основным механизмом изменения зеренной структуры является измельчение (фрагментация, дробление). Актуальность моделирования последнего обусловлена его влиянием на прочностные свойства изделия, в частности, на повышение предела текучести при уменьшении размера зерна согласно закону Холла-Петча.

Для адекватного и корректного описания происходящих внутри материала при неупругом деформировании процессов целесообразным является применение аппарата многоуровневого моделирования [1], основанного на физических теориях пластичности. Многоуровневые конститутивные модели (КМ) явным образом учитывают эволюцию внутренней структуры и реализацию механизмов деформирования за счет введения внутренних переменных и уравнений для их изменения.

В работе предложено расширение для описания процесса измельчения зерен базовой двухуровневой статистической КМ неупругого деформирования ГЦК-поликристалла [1]. Для модификации на первом этапе в КМ встраивается макрофеноменологическая модель ЕТМВ (Y. Estrin, L.S. Toth, A. Molinari, Y. Brechet), предложенная для описания эволюции среднего размера ячеек при деформировании [2]. В рамках модели ЕТМВ рассматривается эффективная (средняя) ячейка в зерне, для выделенных фаз (внутренностей и стенок) которой по отдельности записываются эволюционные соотношения для плотностей дислокаций, учитывающие их генерацию, аннигиляцию и переходы из внутренностей в стенки. На основе определенных плотностей дислокаций для внутренностей и стенок по правилу смесей вычисляется общая плотность дислокаций, со значением которой связывается средний размер ячейки [2]. Совместное применение двухуровневой статистической КМ и модифицированной модели ЕТМВ для описания измельчения зерен рассматривалось для процесса равноканального углового прессования меди [3] и холодной гибки листа стали [4]. На втором этапе формулируется детализированная модель, явным образом учитывающая топологию блочно-ячеистой структуры в зерне и её эволюцию сначала в субзеренную, а затем в новую мелкозернистую структуру за счет взаимных разворотов ячеек (субзерен) друг относительно друга.

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-2024-0002).

### Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.
- [2] Toth L.S., Molinari A., Estrin Y. Strain hardening at large strains as predicted by dislocation based polycrystal plasticity model // J. Eng. Mater. Tech. – 2002. – V. 124. – P. 71–77.
- [3] Romanov K., Shveykin A., Trusov P. Advanced statistical crystal plasticity model: description of copper grain structure refinement during equal channel angular pressing // Metals. – 2023. – V. 13. – 953 (19 p.).
- [4] Romanov K.A., Shveykin A.I. Two-level statistical constitutive model with integrated ETMB model: description of grain structure refinement of AISI 304 steel in cold bending // Russian Physics Journal. – 2024. – V. 67, № 10. – 7 p.



## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННОЙ НЕЙРОСЕТИ

Руденко Ю.К.<sup>1</sup>, Винниченко Н.А.<sup>1</sup>, Пуштаев А.В.<sup>1</sup>, Плаксина Ю.Ю.<sup>1</sup>, Уваров А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва  
[rudenkoyk@gmail.com](mailto:rudenkoyk@gmail.com), [nickvinn@yandex.ru](mailto:nickvinn@yandex.ru), [pushtaev@yandex.ru](mailto:pushtaev@yandex.ru), [yuplaksina@mail.ru](mailto:yuplaksina@mail.ru),  
[uvarov@phys.msu.ru](mailto:uvarov@phys.msu.ru)

Для моделирования процессов тепло- и массопереноса с использованием RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) моделей турбулентности необходимо определить турбулентное число Прандтля. В большинстве расчетов турбулентное число Прандтля предполагается постоянным во всей расчетной области. Тем не менее, в работе [1] с помощью метода LES (Large Eddy Simulation) было показано, что турбулентное число Прандтля зависит от структуры течения и поля турбулентных теплопроводности и вязкости не являются подобными во всей области течения.

В работе предложен способ ассимиляции экспериментальных данных с помощью физически-информированной нейросети (PINN) [2], позволяющий независимо восстанавливать поля турбулентных величин: вязкости и теплопроводности, а также поля скорости и давления для полного описания осесимметричных течений свободной и импактной струи горячего воздуха. При этом используются экспериментально измеренное поле температуры и радиальные профили скорости в нескольких сечениях. В работе поля температуры получены с помощью теневого фонового метода, профили скорости измерены термоанемометром. По сравнению с методом ассимиляции данных с прямой подстановкой экспериментальных данных в систему уравнений гидродинамики с последующим численным решением, восстановление с помощью PINN не требует дополнительной фильтрации зашумленных экспериментальных данных. Вид целевой функции, которая минимизируется в процессе обучения, позволяет учитывать вклад экспериментальных данных и физической составляющей в виде невязок уравнений гидродинамики с различными весами [3]. Сравнение полей величин, восстановленных с помощью PINN и рассчитанных численно с использованием разных моделей турбулентности, показало, что различие между ними не превышает отличия между результатами расчетов с разными моделями турбулентности. Независимое восстановление турбулентной вязкости и теплопроводности позволяет рассчитать поле турбулентного числа Прандтля, которое отражает особенности, полученные в других работах [1].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00591. Работа Ю.К. Руденко также была поддержана Фондом развития теоретической физики и математики “Базис” (грант № 22-2-2-5-1).

### Литература

- [1] DeBonis J.R. Prediction of turbulent temperature fluctuations in hot jets // AIAA J. – 2018. – vol. 56, no. 8, pp. 3097-3111.
- [2] Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E., Physics-Informed Neural Networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // J. Comput. Phys. – 2019. - vol. 378, pp. 686–707.
- [3] Rudenko Y.K., Vinnichenko N.A., Plaksina Y.Y., Uvarova I.F., Ganichev A.A., Uvarov A.V. Complete characterization of axisymmetric turbulent jet using background oriented schlieren and physics-informed neural network // Heat Transf. Res. – 2025.- vol. 56, no. 5, pp. 17-35.

## МНОГОМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ТЕРМОУПРУГОГО КОМПОЗИТА, АРМИРОВАННОГО ТОНКИМИ ВОЛОКНАМИ

Рудой Е.М., Саженов С.А., Фанкина И.В., Фурцев А.И.

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*  
[sazhenkovs@yandex.ru](mailto:sazhenkovs@yandex.ru)

Работа посвящена теоретическому исследованию проблемы описания квазистатического поведения термоупругого композитного тела, прошитого тонкими деформируемыми волокнами. На практике, квазистатический подход к моделированию динамических и тепловых нагрузок на композитные тела (например, детали механизмов, конструкционные элементы строений) находит применение в случаях, когда ускорения в термомеханической системе пренебрежимо малы, и в то же время эффект внутреннего нагрева, вызываемый деформациями, является значительным [1].

На первом этапе исследования, формулируется исходная модель квазистатического поведения многокомпонентного неоднородного термоупругого тела в поле внешних сил при наличии распределённых источников тепла с заданным распределением температуры и перемещений на внешней границе тела, а также начальными условиями для полей перемещений и температуры. В предположении, что тело содержит включение малой толщины, упругие и температурные свойства которого зависят от малого параметра  $\delta$ , характеризующего размеры данного включения, проводится асимптотический анализ при стремлении параметра  $\delta$  к нулю. В результате конструируется модель термоупругого сильно неоднородного композита, содержащего тонкое термоупругое волокно стержневого типа. С помощью метода Галёркина, проводится обоснование математической корректности построенной модели. Затем модель естественным образом обобщается на случай произвольного числа волокон: назовём такую постановку моделью А.

На втором этапе исследования, в предположении, что волокнистый композит содержит порядка  $1/\varepsilon$  волокон, где  $\varepsilon$  – малый положительный параметр, проводится процедура гомогенизации модели А при стремлении  $\varepsilon$  к нулю. В результате процедуры гомогенизации и последующего разделения микроскопического и макроскопического масштабов, конструируется предельная усреднённая модель композита, формулируемая в терминах макроскопических эффективных физических характеристик: эффективных коэффициентов упругости, теплопроводности, теплового расширения, теплоёмкости и плотности. Усреднённая модель является приближённой по отношению к модели А и обладает очевидным преимуществом перед ней с точки зрения дальнейшего численного анализа. А именно, при применении метода конечных элементов (например) к усреднённой модели не возникает необходимости в использовании очень частых сеток, которые приходилось бы использовать для модели А ввиду множественности включений.

Результаты исследования в полном виде опубликованы в статьях [2,3].

### Литература

- [1] Day W. Heat Conduction within Linear Thermoelasticity (Springer Tracts in Natural Philosophy, Vol. 30). New York: Springer, 1985. – 83 p.
- [2] Fankina I.V., Furtsev A.I., Rudoy E.M., Sazhenkov S.A. The homogenized quasi-static model of a thermoelastic composite stitched with reinforcing threads // J. Comput. Appl. Math. – 2023. – V. 434. – Article 115346.
- [3] Fankina I.V., Furtsev A.I., Rudoy E.M., Sazhenkov S.A. A quasi-static model of a thermoelastic body reinforced by a thin thermoelastic inclusion // Math. Mech. Solids – 2024. – V. 29, no. 4. – P. 796-817.

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ФЕРРОЖИДКОСТИ: ТЕСТИРОВАНИЕ АППРОКСИМАЦИОННОЙ ФОРМУЛЫ НА ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Русанов М.С.<sup>1</sup>, Елфимова Е.А.<sup>1</sup>, Зверев В.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург

[mikhail.rusanov@urfu.ru](mailto:mikhail.rusanov@urfu.ru)

Феррожидкость (ФЖ) — это устойчивая коллоидная система, состоящая из магнитных наночастиц (МНЧ), распределенных в жидкости-носителе. Частицы покрыты слоем поверхностно-активных молекул, предотвращающих слипание частиц. Наиболее распространенным материалом для магнитного ядра используется магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Компьютерное моделирование представляет собой эффективный инструмент для исследования ФЖ. Его можно использовать как для проверки разработанных теоретических результатов, так и для анализа свойств ансамбля МНЧ.

В работе [1] была предложена эмпирическая формула, для динамического магнитного отклика, в которой учтена зависимость от амплитуды переменного поля, выраженной через параметр Ланжевена  $\alpha$ , определяемый как отношение магнитной энергии к тепловой, и восприимчивость Ланжевена  $\chi_L$ , оценивающий интенсивность межчастичных взаимодействий. Формулы были получены путем приближения численного решения уравнения Фоккера-Планка к аппроксимационным функциям. Межчастичные взаимодействия в уравнении Фоккера-Планка учитывались с помощью модифицированной теории среднего поля первого порядка [2]. В рамках данного метода учитываются только парные диполь-дипольные взаимодействия. Такой тип взаимодействий справедлив для умеренно концентрированных ФЖ, у которых восприимчивость Ланжевена  $\chi_L$  имеет порядок единицы. В переменных полях с большой амплитудой, где параметр Ланжевена  $\alpha$  много больше единицы, доминирующим становится взаимодействие диполя с магнитным полем. Предложенные в работе [1] формулы, были протестированы на результатах компьютерного моделирования, учитывающим взаимодействия между всеми частицами, чтобы определить области допустимых параметров  $\alpha$  и  $\chi_L$ , которые можно использовать для расчета динамической восприимчивости по аппроксимационным формулам.

Компьютерное моделирование проводилось в программном пакете ESPResSo. Рассматривалась монодисперсная система, состоящая из 512 частиц. В симуляции учитывалось три типа взаимодействий: взаимодействие магнитного момента с переменным магнитным полем, диполь-дипольное взаимодействие и взаимодействие твердых сфер, которое задается потенциалом Вика-Чендлера-Андерсена. Рассматривались значения параметра Ланжевена  $\alpha$ : 1, 5 и 10. Параметр дипольного взаимодействия  $\lambda$  брался равным 1. Объемная доля МНЧ рассчитывалась по формуле  $\varphi = \chi_L/8\lambda$ , где восприимчивость Ланжевена  $\chi_L$  принимала значения: 0.5, 1 и 1.5.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № [23-12-00039](#).

### Литература

- [1] M. S. Rusanov, E. A. Elfimova, V. S. Zverev. Dynamic magnetic susceptibility of a ferrofluid: The influence of interparticle interactions and ac field amplitude – Physical Review E, 104, 2021.
- [2] A. O. Ivanov, V. S. Zverev, S. S. Kantorovich, Revealing the signature of dipolar interactions in dynamic spectra of polydisperse magnetic nanoparticles – Soft Matter 12 (15), 2016 – 3507–3513 p.

## МОДЕЛЬ МАГНИТНОЙ ПОЛИМЕРОСОМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПЕРЕНОСИМОЕ ВЕЩЕСТВО

Рыжков А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[ryzhkov.a@icmm.ru](mailto:ryzhkov.a@icmm.ru)

В числе актуальных проблем современной биомедицины особо выделяется задача управляемой внутриклеточной доставки содержимого. Одним из вариантов решения является использование субмикронных биоподобных контейнеров, в частности магнитных полимеросом (МП) [1]. Замкнутая везикулярная структура амфифильной мембраны МП содержит магнитные наночастицы, что позволяет настраивать свойства и управлять объектом удаленно с помощью магнитного поля. Связанный магнитный, структурный и механический отклик в поле, как предполагается, сказывается на проницаемости мембраны для переносимого в полости везикулы вещества. Для исследования особенностей этого отклика разрабатываемая модель [2] дополнена с целью учесть присутствие в полости МП частиц субстанции.

Вычислительные эксперименты реализованы в программном обеспечении ESPResSo [3] методом крупнозернистой молекулярной динамики. Модельная сферическая МП состоит из частиц трех типов, имитирующих *полимерную* амфифильную оболочку с встроенным слоем из *магнитных наночастиц*, окружающую полость с *содержимым*. Связи и взаимодействия между частицами описаны набором потенциалов; итоговая конфигурация системы, в том числе, с назначенными внешними воздействиями (тепловые колебания по модели термостата и приложенное магнитное поле) получается в результате численного решения уравнений движения частиц. Переносимая субстанция описана набором частиц, в начальный момент расчета равномерно послойно заполняющих полость МП с заданной концентрацией. Модель позволяет также настраивать взаимодействие частиц вещества между собой и со стенками мембраны. Исследован характер миграции частиц переносимого вещества из полости МП в зависимости от свойств и распределения магнитных наночастиц в мембране, в том числе при воздействии внешнего магнитного поля.

Работа выполнена в рамках государственного задания, номер регистрации темы: АААА-А20-120020690030-5.

### Литература

- [1] Oliveira H. et al. Magnetic field triggered drug release from polymersomes for cancer therapeutics // J. Control. Release. – 2013. – Vol. 169. – P. 165–170.
- [2] Рыжков А.В. Моделирование отклика магнитной полимеросомы в неоднородном магнитном поле // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2024. – Т. 14, № 3. – с. 105-119.
- [3] Weik F. et al. ESPResSo 4.0 – an extensible software package for simulating soft matter systems // Eur. Phys. J. Special Topics. – 2019. – Vol. 227. – P. 1789–1816.

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПОВЕДЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 В УСЛОВИЯХ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ**

Сабиров Р.Р.<sup>1</sup>, Вшивков А.Н.<sup>1</sup>, Изюмова А.Ю.<sup>1</sup>, Плехов О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[sabirov@pspu.ru](mailto:sabirov@pspu.ru), [vshivcov.a@icmm.ru](mailto:vshivcov.a@icmm.ru), [fedorova@icmm.ru](mailto:fedorova@icmm.ru), [poa@icmm.ru](mailto:poa@icmm.ru)

В свете стремительного развития технологий и требований, которые предъявляются к эксплуатационным характеристикам материалов и компонентов, лазерная ударная обработка является перспективной методикой упрочнения поверхности, которая позволяет значительно увеличить усталостный ресурс металлических деталей. Лазерный импульс высокой интенсивности, воздействуя на обрабатываемую поверхность, создает активно расширяющуюся плазму, в результате чего генерируется ударная волна способная пластически деформировать материал. Сжимающие остаточные напряжения, возникающие при пластическом деформировании материала, могут достигать 1 мм в глубину.

Работа посвящена исследованию гигациклового усталости образцов из титанового сплава ВТ6, который является распространенным конструкционным материалом в авиационной промышленности. На ультразвуковой испытательной машине проводятся усталостные тесты для двух серий образцов до и после лазерной ударной обработки. Помимо пределов усталости и особенностей формирования усталостных трещин изучается динамика нагрева образцов в эксперименте, что является важной методической задачей, поскольку значительное повышение температуры образцов в процессе усталостных испытаний выступает серьезным ограничением при проведении исследований в области гигациклового усталости.

Работа выполнена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329).

## ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ЧЕРЕЗ $J_k$ -ИНТЕГРАЛЫ ДЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Савиковский А.В.<sup>1,2</sup>, Семенов А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «Силловые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт», Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

[Savikovskiy\\_AV@power-m.ru](mailto:Savikovskiy_AV@power-m.ru)

Рассматривается вычисление параметров механики разрушения – коэффициентов интенсивности напряжений (КИНов) через контурные  $J_k$ -интегралы при смешанной моде разрушения. Инвариантные  $J_k$ -интегралы вычисляются с помощью метода эквивалентного объемного интегрирования (ЭОИ) [1]. При вычислении интеграла  $J_2$  для обеспечения его инвариантности необходимо учитывать слагаемые по берегам трещины, вычисление которых стандартными методами приводит к значительным ошибкам в окрестности вершины трещины [2]. Целью работы является разработка различных методов экстраполяции значений  $J_2$ -интеграла по берегам трещин в ее вершину, а также сравнение точности вычисления КИН различными методами. Также в работе получены и верифицированы формулы вычисления КИН через  $J_k$ -интегралы для кубической симметрии материала. Тестирование предложенных соотношений для вычисления КИН и экстраполяции слагаемого по берегам трещины для  $J_2$ -интеграла выполнялось на основе КЭ-решения краевой задачи о наклонной прямолинейной трещине в бесконечной пластине. Материал плоскости является анизотропным линейно-упругим. При вычислении слагаемого по берегам трещины используются три основных метода: вычисление без экстраполяции, зануление в первом контуре около вершины трещины и степенная экстраполяция значений около вершины трещины через значения интеграла  $J_2$  на предыдущих контурах интегрирования. Результаты вариантов экстраполяций сравниваются для разных углов наклона трещины. Основным выводом работы является то, что лучший метод – степенная экстраполяция интеграла  $J_2$  около вершины трещины. Результаты сравнения вычисления КИН разными методами представлены на рис. 1.

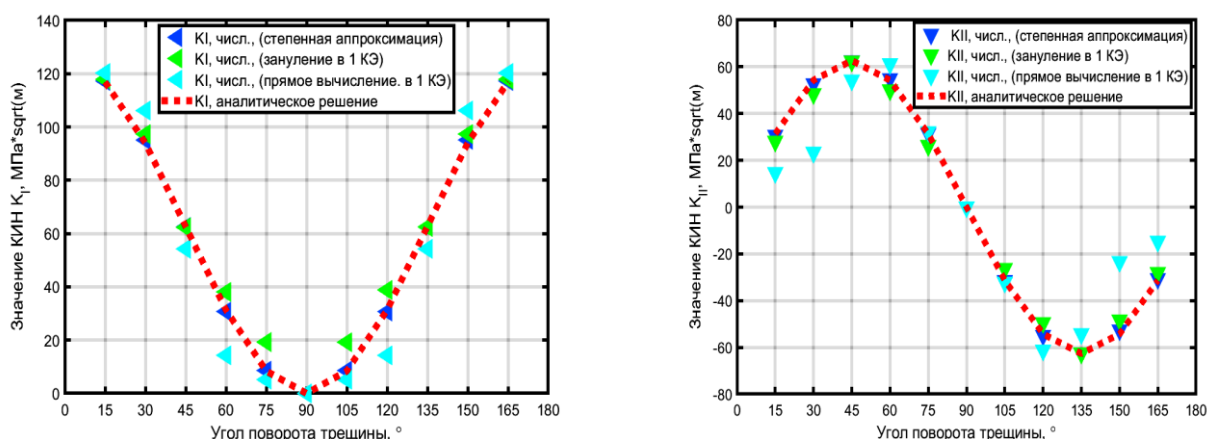


Рис. 1. Результаты сравнения вычисления КИН с помощью разных методик экстраполяции.

### Литература

- [1] Вычислительные методы в механике разрушения / [Эрдоган Ф., Кобаяси А., Атлури С. и др.]; Под ред. С. Атлури; Пер. с англ. А. С. Кравчука, Е. Г. Кузовкова. — Москва : Мир, 1990. — 391 с.
- [2] Eischen J. W. An improved method for computing the  $J_2$  integral // Engineering Fracture Mechanics. – 1987. – V. 26. – №. 5. – pp. 691-700.

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТЕЙ, ДВИЖУЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ АМПЕРА И ТЯЖЕСТИ

Садилов Е.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
[sadilove@icmm.ru](mailto:sadilove@icmm.ru)

Впервые влияние магнитного поля на течение проводящей жидкости в канале было изучено в пионерской работе Гартмана [1]. В его работе магнитное поле носило пассивный характер. Существуют ситуации, когда магнитное поле играет активную роль. Для этого нужно, чтобы через систему протекали электрические токи под действием внешней силы. В этом случае мы имеем дело с МГД-двигателем. Имеется большое количество работ по изучению МГД-двигателей.

Неустойчивость двухслойной системы жидкостей, текущих с разными скоростями, в отсутствие магнитного поля впервые была изучена Кельвином и Гельмгольцом (см. [2]).

В данной работе изучается наклонный слой, заполненный двумя жидкостями. Предполагается, что нижняя жидкость электропроводная (например, жидкий металл), а верхняя – неэлектропроводная (диэлектрик). Также считается, что нижняя жидкость имеет большую плотность, чем верхняя. Слой ограничен двумя диэлектрическими пластинами. Через слой в горизонтальном направлении пропускается электрический ток. Также на слой воздействует вертикальное магнитное поле. Эти два факта приводят к тому, что на проводящую жидкость воздействует сила Ампера. Помимо этого на обе жидкости действует сила тяжести. Фактически, данная система представляет из себя МГД-двигатель.

Для изучения данной задачи используется система уравнений магнитной гидродинамики (см. [2-3]). Рассмотрены межфазные граничные условия (кинематическое граничное условие, динамическое граничное условие и условие непрерывности напряженностей магнитного поля).

Найдено основное состояние. Исследована его устойчивость по отношению к длинноволновым возмущениям. Использован метод многих масштабов. Аналитическое решение получено. Найдена зависимость критического значения Гартмана от магнитного числа Прандтля, отношения плотностей, контраста вязкостей. Получено дисперсионное соотношение для критических возмущений. Построены нейтральные кривые.

### Литература

- [1] Hartmann J. Hg-Dynamics I. Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field //Det. Kgl. Danske Videnskabernes Selskab. Matematisk.-fysike Meddelelser. – 1937. – т. XV, 6.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 736 с.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 656 с.
- [4] Куликовский А.Г., Любимов Г.А. Магнитная гидродинамика – М.: Логос, 2005. – 328 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАНОВКИ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

Садовченко Е.А.<sup>1</sup>, Жмайло М.А.<sup>1</sup>, Черновол Е.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова, Санкт-Петербург

sadovchenko.e@compmechlab.ru, zhmaylo@compmechlab.com, clinic@stomus.ru

Процесс установки дентальных имплантатов является достаточно трудоемким и сложным, поскольку сопряжен с различными рисками, одним из которых является нестабильность имплантата. В настоящее время опубликован ряд статей, описывающих моделирование установки дентальных имплантов [1], [2]. Метод конечных элементов является универсальным при решении задач механики и позволяет на основе данных о геометрии объекта, характеристиках его материала и нагружении рассчитать поля напряжений, деформаций, перемещений и других величин, с помощью которых возможно проведение оценки напряженно-деформированного состояния в зоне установки имплантата, что является одной из основных целей данного исследования.

В настоящей работе рассмотрены различные подходы к моделированию процесса установки дентальных имплантатов в костные блоки разной плотности с применением метода конечных элементов.

Первый подход основан на использовании модели разрушения Ductile damage для материала костного блока. Данная модель так же используется в работе [3]. Модель предполагает, что эквивалентная пластическая деформация в начале повреждения является функцией трехосности напряжений и скорости деформации. Для построения модели разрушения проводились различные натурные испытания по определению эквивалентной пластической деформации разрушения в случае различных значений трехосности. Второй подход реализуется без использования модели разрушения.

В результате работы определены физико-механические константы материалов костных блоков в случае различных плотностей, построены динамические цифровые модели, описывающие процесс установки, проведена валидация данных моделей с результатами натурных испытаний по графикам зависимости крутящего момента при установке имплантата от угла закручивания. Далее проведен анализ напряженно-деформированного состояния костного блока в случае различных типов имплантатов и различных плотностей костных блоков. Также выдвинуты гипотезы об основных факторах, влияющих на стабильность фиксации имплантатов в костной ткани.

### Литература

- [1] Dorogoy, A., Rittel, D., Shemtov-Yona, K., Korabi, R. Modeling dental implant insertion. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2017, 68: 42-50.
- [2] Marcián P. et al.//Micro finite element analysis of dental implants under different loading conditions/Comput. Biol. Med. (2018)
- [3] Demirbas, A.E., Ekici, R., Karakaya, M., Alkan, A. Bone stress and damage distributions during dental implant insertion: a novel dynamic FEM analysis. Computational Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2022, 25(12): 1381-1392.



## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОРАЗМЕРНОЙ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ $\alpha$ - $\beta$ ФАЗ В СПЛАВЕ ВТ6 С ПОМОЩЬЮ ИСПЫТАНИЙ МИКРОКОЛОНН НА СЖАТИЕ В КАМЕРЕ СЭМ

Садыкова Ю.А.<sup>1</sup>, Статник Е.С.<sup>1,2</sup>, Салимон А.И.<sup>1,2</sup>, Корсунский А.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва

<sup>2</sup>Московский Авиационный Институт (МАИ), Москва

[Julia.Sadykova@skoltech.ru](mailto:Julia.Sadykova@skoltech.ru)

В современном авиационном конструировании важнейшими задачами является обеспечение безопасности и надежности, продление срока службы летательных аппаратов, уменьшение массы компонентов, повышение эффективности и технологичности производства, и улучшение соотношения веса и прочности. Эти параметры взаимосвязаны и в значительной степени определяются удельными прочностными характеристиками материалов. Титановые сплавы имеют одни из самых высоких значений удельной жесткости и прочности среди металлических материалов, однако проектирование таких сплавов сопряжено с определенными трудностями в силу их сложной структуры, влияния обработки на свойства и их зависимости от ориентации зёрен или текстуры.

В докладе представлены результаты исследования микромеханических свойств титанового сплава ВТ6. Особое внимание уделяется влиянию ориентации зерен, кристаллографической структуры и особенностей фазового состава материала на его механическое поведение в микромасштабе. Применены подходы, позволяющие более точно исследовать свойства и характеристики кристаллического скольжения посредством исследования образцов в виде микроколонн, изготовленных ионным травлением в камере ФИП-СЭМ. Ориентация зерен определялась методом дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ). Испытания микроколонн на сжатие *in situ* в камере двухлучевого электронно-ионного микроскопа проводилось с помощью наноиндентора Alemnis.

В ходе работы были выявлены значительные различия в критическом значении приведенного напряжения сдвига (КЗПНС) и механизмах деформации между различными фазами сплава и ориентациями зерен. Результаты демонстрируют существенное влияние микроструктуры на механические свойства и процессы деформации и разрушения титановых сплавов. Получена ценная информация для проектирования и оптимизации компонентов из титановых сплавов, используемых для изготовления ответственных деталей машин и транспортных систем.

### Литература

- [1] Somov, P. A., Statnik, E. S., Malakhova, Y. V., Nyaza, K. V., Salimon, A. I., Ryabov, D. K., & Korsunsky, A. M. (2021). On the Grain Microstructure–Mechanical Properties Relationships in Aluminium Alloy Parts Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Metals*, 11(8), 1175. <https://doi.org/10.3390/met11081175>
- [2] Hosseini, A. M., Masood, S. H., Fraser, D., & Jahedi, M. (2012). Mechanical Properties Investigation of HIP and As-Built EBM Parts. In A. M. Hosseini, S. H. Masood, D. Fraser, & M. Jahedi, *Advanced materials research* (Vol. 576, p. 216). Trans Tech Publications. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.576.216>
- [3] Jun, T., Sernicola, G., Dunne, F. P., & Britton, T. B. (2015). Local deformation mechanisms of two-phase Ti alloy. *Materials Science and Engineering A*, 649, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.016>

## ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Салихова Н.К.<sup>1</sup>, Дудин Д.С.<sup>1</sup>, Келлер И.Э.<sup>1,2</sup>, Петухов Д.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[salikhova@icmm.ru](mailto:salikhova@icmm.ru), [dmitryovj@yandex.ru](mailto:dmitryovj@yandex.ru), [kie@icmm.ru](mailto:kie@icmm.ru), [petuhovds@mail.ru](mailto:petuhovds@mail.ru)

Настоящая работа посвящена численному моделированию формирования остаточных напряжений, возникающих в процессе различных режимов градиентной термомеханической обработки. Материалом исследования служил прокат из низколегированной судовой стали А32. Сначала три вырезанных из стали образца с размерами 300×60×14 мм подвергались выдержке в печи при температуре отжига 900°С в течение 21 мин с последующим односторонним охлаждением поверхности со скоростью 50-80°С/с. Два из этих образцов перед термообработкой подвергались трехточечному испытанию на изгиб с максимальным отклонением центра образца до 50 мм относительно нейтральной плоскости. Далее согласно технологическому процессу заготовки подвергались ускоренному охлаждению – с выгнутой или вогнутой стороны. После полного медленного охлаждения заготовок на воздухе следовал этап правки на прессе. Для сравнительного анализа один образец подвергся односторонней закалке без предварительного изгиба. Для определения распределения остаточных напряжений и пластических деформаций из средней части всех трех заготовок вырезался брус размером 300×10×14 мм.

Для исследования возникающих собственных деформаций, и порождаемых ими остаточных напряжений по толщине слоя, разработана двумерная численная модель процесса градиентной термомеханической обработки заготовки, включающей несвязанный расчет тепловой и упругопластической задач в COMSOL Multiphysics. Численный расчет выполнен при исходных данных, задающих свойства материала в виде нелинейных зависимостей: для теплового анализа – удельная теплоемкость, коэффициент линейного температурного расширения и теплопроводности; для прочностного анализа – коэффициент Пуассона, модуль Юнга и модель упрочнения Джонсона-Кука. В процессе термической обработки для упрочнения судовой стали в качестве закалочной (охлаждающей) среды используется – вода. Расчет этапа ускоренного охлаждения выполняется при использовании коэффициента теплоотдачи, зависящего от температуры. Для моделирования пластического изгиба, собственные деформации вводятся в численный расчет в качестве источника остаточных напряжений. Установлено, что независимо от способа применения технологии термоупрочнения прокатов в поверхностном (нижнем и верхнем) слое формируется слой сжимающих напряжений, порождаемый пластическими деформациями растяжения. Во внутренних слоях, наблюдаются пластические деформации сжатия, которые порождают растягивающие остаточные напряжения. Выполнена верификация результатов численного моделирования и экспериментальных данных определения остаточных напряжений методом разрезания [2] и сверления вблизи границ.

### Литература

- [1] А.Б. Максимов, Ю.Г. Пронина. Исследование изгиба толстолистового проката с градиентом прочностных свойств по толщине // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.–2022.–Т. 65, № 1.– С. 21– 27.  
[2] Келлер И.Э., Петухов Д.С., Дудин Д.С., Пермьяков Г.Л., Трушников Д.Н. Способ определения остаточных напряжений в ребре на жестком основании. Патент на изобретение № RU 2797771 С1 от 08.06.2023

## РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ $V_4C-BN-C$

Салтыков И.Р., Кривилев М.Д., Харанжевский Е.В.

Удмуртский государственный университет, Ижевск  
*ir.saltykov@gmail.com*

С развитием машиностроения повышается потребность в материалах с высокими механическими свойствами. Большинство деталей машин изготовлены из сталей и сплавов, основным компонентом которых является железо. Часто самой уязвимой областью, с которой начинается разрушение, оказывается поверхность изделия, в связи с чем свойства поверхностного слоя играют особую роль. Для его упрочнения предлагается создание металлокерамического композитного материала путём добавления твердых керамических частиц кубического нитрида бора ( $\beta$ -BN) в стальную матрицу методом лазерной наплавки.

Целью исследования является анализ напряженно-деформированного состояния для керамических покрытий на основе карбида и нитрида бора, нанесённых на металлическую поверхность. Объект исследования – керамическое покрытие состава  $V_4C-BN-C$  с добавками оксидов MgO и  $Li_2O$ , нанесённое на подложку из стали 40X [1]. В работе использовался метод численного моделирования в ПО COMSOL MultiPhysics, а также проводились аналитические расчеты в среде MATLAB.

Аналитический расчет проводился при помощи модели полученной в работе [2] с целью определения эффективного модуля объёмного сжатия  $K_{эфф.}$  для керамического покрытия со сверхтвердыми дисперсными частицами. Исследованы также зависимости  $K_{эфф.}$  от модуля упругости упрочняющих частиц, размера включений, расстояния между включениями, размера переходного слоя между включением и матрицей.

В численном расчете рассматривался процесс остывания покрытия после лазерной наплавки в интервале температур от 1000 до 20 °С. Основной причиной возникновения напряжений в исследуемой области являются различия в коэффициентах температурного расширения стальной подложки и керамического покрытия. Расчет проводился в двух постановках. В первом случае рассматривалось изотропное керамическое покрытие с осредненными механическими свойствами и анализировались главным образом напряжения, возникающие на границе “подложка–покрытие”. Полученные значения составили ~ 2000 МПа. Во второй постановке область покрытия содержала круглое включение. Его границы оказались зоной локализации максимальных возникающих напряжений, которые достигают в среднем 3000–4000 МПа.

Результаты расчетов показали малое влияние свойств дисперсных частиц на коэффициент объёмного сжатия покрытия. При этом интенсивность напряжений на границе “подложка–покрытие” вблизи включения сопоставимы с критическими значениями, достаточными для развития продольной трещины.

Авторы благодарят РНФ за финансовую поддержку в рамках проекта № 19-79-20012.

### Литература

- [1] Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Krivilyov M.D., Makarov A.V., Gil'mutdinov F.Z., Volkova E.G. Ultralow friction behaviour of  $V_4C-BN-MeO$  composite ceramic coatings deposited on steel // *Surface and Coatings Technology*, 390 (2020) 125664.
- [2] Кочетков В.А. Расчет характеристик упругих и теплофизических свойств многофазного композита, содержащего составные или полые сферические включения // *Механика композитных материалов*. — 1994. — Т. 30. — N 4. — С. 512–519.

## О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОТИПА ИЗОЛЯЦИОННОЙ ПЕРЕМЫЧКИ В ПРОЦЕССЕ ГИДРОЗАКЛАДКИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Сахабутдинова Л.Р.<sup>1</sup>, Носов Ю.О.<sup>1</sup>, Николаев А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[lvaysans@list.ru](mailto:lvaysans@list.ru)

Пермский край входит в ТОП-14 регионов по объемам отгруженных товаров собственного производства в отрасли добычи полезных ископаемых. Огромные объемы выработанного пространства должны быть своевременно ликвидированы (законсервированы) при прекращении пользования недрами, согласно распоряжению Правительства Российской Федерации, ведомственных постановлений и приказов. Одним из эффективных способов ликвидации выработанного пространства является закладка отработанных горных выработок твердеющими закладочными смесями [1], отличающаяся высокой производительностью и надежностью, незначительной усадкой, сохранностью земной поверхности в любых горнотехнических условиях. В рамках технологии закладки выработанного пространства требуется возведение минимум одной изоляционной перемычки. Закладка выработанного пространства выполняется поэтапно: отделяется часть выработанного пространства, затем с верхнего уровня создается скважина для подачи закладочной смеси; закладочная смесь постепенно заполняет отгороженную часть выработанного пространства, затем схватывается и застывает.

Для совершенствования процесса гидрозакладки стоит актуальная проблема разработки нового вида шахтной изоляционной перемычки, главными отличиями которой должны стать быстрый монтаж и демонтаж, а также возможность многократного использования. Одним из ключевых этапов разработки нового вида конструкции является исследование деформационного поведения конструкции в процессе эксплуатации.

Ранее была рассмотрена первая модель перемычки, для которой проведена оценка влияния толщины стенок несущего каркаса на напряженно-деформированное состояние конструкции [2]. На основе полученных результатов сделан вывод о необходимости повышения жесткости предлагаемой конструкции изоляционной перемычки.

В рамках данной работы рассмотрена геометрия изоляционной перемычки, без привязки к точной геометрии шахты, реализована автоматизированная численная процедура построения численной модели поэтапного заполнения выработанного пространства. Рассмотрена выработка размером 3х3 метра, плотность раствора принята 2200 т/м<sup>3</sup>. Проведена серия вычислительных экспериментов для оценки влияния числа горизонтальных и вертикальных балок несущего каркаса на перемещения конструкции по нормали к плоскости перемычки. Установлено, что увеличение числа горизонтальных и вертикальных балок ведет к равномерному перераспределению перемещений и снижению максимальных напряжений, реализующихся в конструкции. При этом, увеличение горизонтальных балок свыше 7 штук, вертикальных балок свыше 8 штук не приводит к значительным различиям.

### Литература

- [1] Коликов К.С., Мазина И.Э., Урузбиева А.Г. Закладка выработанного пространства как способ снижения негативного экологического воздействия при подземной угледобыче // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 5. – С. 252-259.
- [2] Каменских А.А., Николаев А.В., Носов Ю.О., Сахабутдинова Л.Р. Разработка математической модели деформационного поведения изоляционной перемычки в процессе гидрозакладки горной выработки// Безопасность труда в промышленности. — 2024. — № 11. — С. 7-14. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-11-7-14.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И ЗОН КАВИТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В ЖИДКОСТИ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Сбоев И.О.<sup>1</sup>, Любимова Т.П.<sup>2</sup>, Кучинский М.О.<sup>2</sup>, Рыбкин К.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>3</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
[ivan-sboev@yandex.ru](mailto:ivan-sboev@yandex.ru), [lyubimovat@mail.ru](mailto:lyubimovat@mail.ru), [kat6chinskiy@gmail.com](mailto:kat6chinskiy@gmail.com), [k.rybkin@gmail.com](mailto:k.rybkin@gmail.com)

Кавитационные процессы, сопровождающиеся образованием и развитием парагазовых пузырьков в жидкости, играют важную роль во многих технологических процессах. Кавитация позволяет повысить эффективность физико-химических процессов в камерах сонохимических реакторов, а также находит применение при обогащении различных руд с использованием флотационных машин [1-4]. С другой стороны, вызываемое кавитацией механическое разрушение поверхностей (кавитационная эрозия) оказывает существенное влияние на срок службы и условия эксплуатации, например, деталей и узлов газовых турбин [5]. Одним из направлений в области изучения кавитации является исследование распределения зон кавитационной активности, возникновение которых обусловлено неоднородностью акустического давления. В настоящей работе выполняется трехмерное численное исследование стационарного распределения акустического давления в рабочей полости, заполненной жидкостью. Совместно с численным моделированием проводится экспериментальное исследование расположения этих зон со структурой рассчитанного звукового поля внутри рабочей полости. В численных расчетах для простоты рассматриваются стоячие ультразвуковые волны. Изучается стационарное распределение акустического давления над круглым излучателем. При моделировании ультразвуковых стоячих волн рассматривается сжимаемая среда, причем диссипация звуковой энергии, обусловленная наличием вязкого трения и образованием парагазовых пузырьков в жидкости, не учитывается. На верхней и боковой границах рабочей полости задается нулевое давление, либо условие импеданса. Исследуется распределение акустического давления в стоячей ультразвуковой волне при резонансных и нерезонансных рабочих частотах излучателя. Выполняется сравнение распределения акустического давления в центральном сечении рабочей полости с фотографиями поверхности алюминиевой фольги, полученными в натурном эксперименте методом foil test [6,7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-11-00269).

### Литература

- [1] Yasui K. Acoustic Cavitation and bubble dynamics. Springer International Publishing: Cham, 2018.
- [2] Nguyen T. T., Asakura Y., Koda S., Yasuda K. Dependence of cavitation, chemical effect, and mechanical effect thresholds on ultrasonic frequency // Ultrasonics sonochemistry. – 2017. – т. 39. с. 301–306.
- [3] Shen Z. Principles and Technologies of Flotation Machines. Singapore: Springer Singapore, 2021.
- [4] Kim K. H., Chahine G., Franc J. P., Karimi A. (eds.). Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction, 2014.
- [5] Krella A. K. Degradation and protection of materials from cavitation erosion: A review // Materials. – 2023. т. 16, № 5. с. 2058.
- [6] Sboev I., Lyubimova T., Rybkin K., Kuchinskiy M. Numerical investigation of the effect of boundary conditions on acoustic pressure distribution in a sonochemical reactor chamber // Fluid Dynamics & Materials Processing. – 2024. т. 20, № 6.
- [7] 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.

## **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ С ПОМОЩЬЮ МЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ**

Седова Ю.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург*  
[sedova.yus@mail.ru](mailto:sedova.yus@mail.ru)

Статистический анализ данных современной научно-технической литературы, а также данных, полученных при эксплуатации котельного оборудования, показывает, что хрупкое или частично хрупкое разрушение труб поверхностей нагрева является наиболее частой причиной выходов из строя котельного оборудования. За последние годы наблюдается устойчивый рост частоты таких отказов и сокращение общего срока службы труб поверхностей нагрева.

Вместе с тем, результаты ряда опубликованных работ продемонстрировали наличие прямой взаимосвязи между объемным распределением растворенного водорода в стенках труб поверхности нагрева и механическими свойствами металла даже в пределах одной вырезки из трубы.

Авторами были проведены механические испытания на растяжение кольцевых образцов и продольных образцов из стали 20, вырезанных из новых (в состоянии поставки) и длительное время эксплуатирующихся труб поверхностей нагрева поперек и вдоль оси труб, соответственно. Они показали наличие принципиально значимой разницы между диаграммами напряжения-деформации образцов, вырезанных из новых труб и из труб после эксплуатации. Обнаруженные отличия требуют интерпретации, так как они могут стать ценными индикативными параметрами для новой методики входного и эксплуатационного контроля труб и трубной продукции.

В настоящей работе была решена задача такой интерпретации экспериментальных инженерных кривых напряжения-деформации, полученных в результате проведения испытаний продольных и кольцевых образцов с известным, измеренным заранее объемным распределением растворенного водорода. Было проведено многофакторное конечно-элементное моделирование в пакете ANSYS, с использованием классических моделей водородной хрупкости.

Уже в первом приближении удалось повторить характерные особенности кривых напряжения-деформации для кольцевых образцов, содержащих большие и маленькие концентрации водорода, которые были получены при проведении механических испытаний. Комплексный подход к учету влияния растворенного в металле водорода на предел текучести всего материала, а также водородной дегградации максимальных когезионных напряжений, связывающих берега трещины (модель HEDE [1]), позволил промоделировать вызванное накоплением водорода смещение инженерной кривой, и кроме того, уменьшение величины определяемого по инженерной кривой предела прочности материала. Моделирование позволило также объяснить причины обнаруженной экспериментально анизотропии механических характеристик металла труб после эксплуатации в составе котла. Источником такой анизотропии оказались множественные микротрещины на внутренней поверхности трубы, ориентированные преимущественно вдоль ее оси, которые были обнаружены экспериментально.

Литература

[1] Oriani R.A. A mechanistic theory of hydrogen embrittlement of steels // Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie. – 1972. – Vol. 76, No. 8. – pp. 848-857.

## УЧЕТ ГЕОМЕТРИИ МЕЖЗЕРЕННОЙ ГРАНИЦЫ В СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Селиванов Г.Д., Котельникова Н.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

selivanovgd@gmail.com

Рассматривается модифицированная статистическая модель для описания деформирования представительного макрообъема поликристалла с переходом к межзеренному разрушению. В модели [1], учитывающей соседство зерен, используется критерий [2], определяющий критическую величину  $\tau_{ci}$  касательных напряжений на системе скольжения (СС), при достижении которой происходит зарождение микротрещины в границе:

$$\tau_{ci}^{(i,j),k} = \tau_0 + \left[ \frac{2\mu\gamma_{eff}^{(i,j)}}{(1-\nu)d} \right]^{1/2} F(0, \chi_k), \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – предельное напряжение, необходимое для начала пластической деформации,

$F(0, \chi_k) = \left( \frac{4}{5 + 2 \cos \chi_k - 3 \cos^2 \chi_k} \right)^{1/2}$  – геометрический коэффициент зарождения трещины на

границе зерна,  $\chi_k$  – угол наклона границы по отношению к  $k$ -й СС краевых дислокаций,  $\gamma_{eff}$  – работа декогезии границы, зависящая от угла разориентации  $\theta$  соседних зерен  $i$  и  $j$ ,  $\mu$  – модуль сдвига,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $d$  – размер зерна.

Рассмотрена зависимость величины  $\tau_{ci}$  от  $\chi_k$  ( $\theta = 0^\circ$ , рис. 1 (а)) и от  $\theta$  ( $\chi_k = 0^\circ$ , рис. 1 (б)).

Параметры материала соответствуют чистому алюминию. В первом случае минимальное значение  $\tau_{ci} = 15,4$  МПа достигнуто при  $\chi_k = 71^\circ$ . Во втором случае минимальное значение  $\tau_{ci} = 14,9$  МПа достигнуто при  $\theta \in (20; 70)^\circ$ .

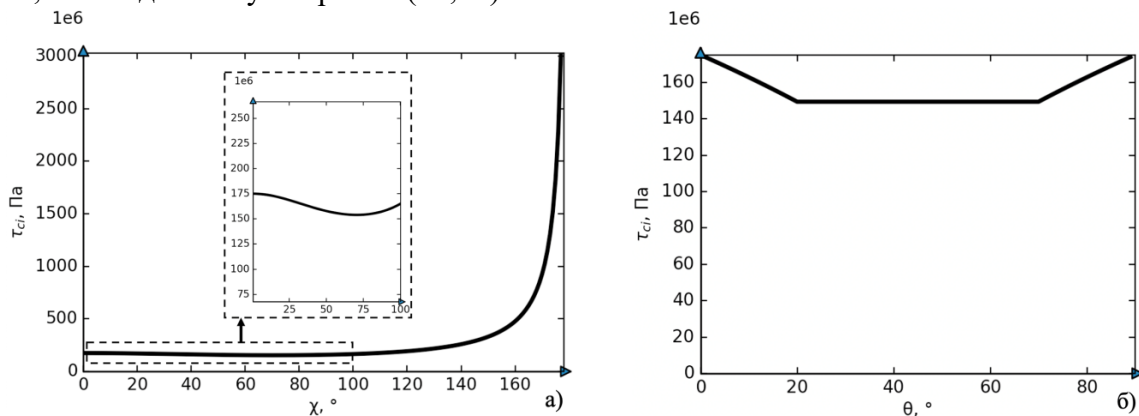


Рисунок 1. Зависимость критической величины  $\tau_{ci}$  от углов  $\chi_k$  (а),  $\theta$  (б)

Таким образом, получены геометрические характеристики конфигурации границы, для которой наиболее вероятно образование зародыша межзеренной трещины.

### Литература

- [1] Селиванов Г.Д. Построение математической модели для анализа деформирования и межзеренного разрушения поликристаллов // Математическое моделирование в естественных науках. – 2023. – Т. 1. – С. 292-294. EDN: GHHСJW
- [2] Wenbin Liu, Yangyang Cheng, Haonan Sui, Jiaqi Fu, Huiling Duan. Microstructure-based intergranular fatigue crack nucleation model: Dislocation transmission versus grain boundary cracking // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2023. – № 173

## РАЗРАБОТКА РЕЛАКСАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЕДИНОЙ УСТАЛОСТНОЙ КРИВОЙ

Селютина Н.С.<sup>1,2</sup>, Петров Ю.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

[n.selyutina@spbu.ru](mailto:n.selyutina@spbu.ru), [y.v.petrov@spbu.ru](mailto:y.v.petrov@spbu.ru)

Продолжена релаксационно-кинетическая модель [1] для прогнозирования единой усталостной кривой в режимах малоциклового, многоциклового и гигациклового усталости. Релаксационная часть модели [2] позволяет прогнозировать полный деформационный отклик при циклическом деформировании, на основе которого можно одновременно прогнозировать эффекты стабилизации пластической деформации и оценивать различные ключевые характеристики, такие как плотность энергии деформации и циклическая прочность материала. Кинетическая часть модели позволяет учитывать эволюцию повреждений на основе начальных данных о плотности энергии деформации по релаксационной части модели. Предполагается, что влияние стабилизированной пластической деформации и предшествующего деформационного отклика материала имеют решающее значение для прогнозирования циклической прочности материала. В данном исследовании прогнозируются кривые усталости при ступенчатой нагрузке и симметричной синусоидальной нагрузке. Простая численная схема модели успешно применяется к материалам, испытанных при различных видах нагружения, поскольку релаксационно-кинетическая модель носит феноменологический характер. Показано, что в рамках единого подхода можно автоматически строить деформационный отклик материала и усталостную кривую, не используя широко известный эмпирический подход со сдвигом петли гистерезиса.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 23-71-01059).

### Литература

- [1] Петров Ю. В., Селютина Н. С., Антонова М. Н. Прогнозирование многостадийной усталостной кривой на основе релаксационной модели необратимого циклического деформирования // Доклады Академии Наук. Физика, Технические науки. – 2024. – т. 517. – с. 41-47.
- [2] Selyutina N. S., Petrov Y. V., Effect of plastic strain stabilization under low-cycle deformation //Physical Mesomechanics. – 2015. – т. 50, № 6. – с. 1527-1535.



## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОГО И ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ БЕТОНОВ

Селютина Н.С.<sup>1</sup>, Хайретинова Д.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

[n.selyutina@spbu.ru](mailto:n.selyutina@spbu.ru), [dkhay1810@gmail.com](mailto:dkhay1810@gmail.com)

В этой работе, предлагается учитывать оба эффекта температуры и скорости на основе термофлуктуационной теории прочности и критерия инкубационного времени. Рост прочности со скоростью деформации прогнозируется на основе критерия инкубационного времени [1,2]. Инкубационный период является независимой характеристикой материала, отражающей его чувствительность к скорости деформации. Введение инкубационного периода позволяет оценить динамическую прочность материала в широком диапазоне скоростей деформации (как в статическом, так и в динамическом режимах нагружения) и может быть использовано в качестве характеристики материала. На основе термофлуктуационной теории вводятся температурные зависимости для статической прочности и характерного времени релаксации. В качестве характеристики, связанной со скоростью возрастания прочности или скоростной чувствительностью материала к нагрузке, в критерии инкубационного времени используется характерное время релаксации. Предлагаемая модель хорошо прогнозирует прочность бетонов с известняковым, базальтовым и песчаным щебнями в различных температурно-скоростных режимах (диапазон температур от 20 °С до 950 °С). Для бетона с базальтовым щебнем характерное время релаксации убывает увеличением температуры выше комнатной, а затем возрастает. Для бетонов с песчаным и известняковым щебнем наблюдается только возрастающая зависимость характерного времени релаксации в диапазоне температур 20 °С до 950 °С. Показано, что большая прочность бетона в зависимости от выбора щебня может меняться в различных температурно-скоростных режимах и может быть спрогнозирована предлагаемой моделью.

### Литература

- [1] Petrov Y.V., Karihaloo B.L., Bratov V.V., Bragov A.M. Multiscale dynamic fracture model for quasi-brittle materials// International Journal of Engineering Science. – 2012. – V. 61. – p. 3-9.  
[2] Selyutina N.S., Petrov Y.V. Fracture of saturated concrete and rocks under dynamic loading// Engineering Fracture Mechanics. – 2020. – 225. – p. 106265.

## КВАНТОВАЯ ГИДРОДИНАМИКА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ЛАГРАНЖА И ГАМИЛЬТОНА: РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ, НЕЛОКАЛЬНОСТЬ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ФАЗЫ

Серебренников А. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[al-serebr02@yandex.ru](mailto:al-serebr02@yandex.ru)

В докладе рассматривается квантово–гидродинамическая модель, базирующаяся на гипотезах о характере зависимости функции плотности от кинематических обобщенных координат. Строится лагранжиан и с помощью принципа наименьшего действия выводится уравнение движения системы вещество–поле на примере газа электронов проводимости, взаимодействующего со светом в плазменных металлах [1,2]. Интегрирование уравнения порождает каноническое преобразование обобщенного импульса в функционал одночастичного действия. Использование принципа Гамильтона с полуклассической функцией по канонически сопряженным переменным дает стандартное уравнение квантовой гидродинамики (КГ) [3]. Сравнение двух показывает различие в функции квантового давления. (В выступлении подробно анализируется лагранжев случай.) Методами комплексного анализа из уравнения движения извлекается функция поляризованности, комбинирующая друдевскую и нелокальную составляющие. Последняя обладает тензорным ядром. Ассоциированная с ним анизотропия наводится в первоначально изотропной среде, выделенное направление создается электрическим полем и определяется геометрией объекта – функцией плотности. Параллельно уравнение движения допускает “фазовую” трактовку и связывает динамическую, кинематическую и геометрическую фазы. Последняя в точности совпадает с выражением Ааронова–Бома [4]. Линеаризация плотности по функции перемещений позволяет свести уравнения движения к форме простого осциллятора. Для тензора жесткости и эффективной массы получены аналитические выражения. Благодаря им априорная информация о резонансном поведении появляется без необходимости решения динамической начально–краевой задачи. Для определения резонансных частот требуется знание плотности в основном состоянии. Последнее появляется из решения той же гидродинамической модели. Методом конечных разностей получено численное решение в динамическом случае. Спектральный отклик выделен дискретным преобразованием Фурье. Получено совпадение с априорной оценкой. Исследования проведены для сферических наночастиц натрия в условиях локализованного плазмонного резонанса (ЛПР). Предложенная модель выявляет в основном его поверхностный характер. Результаты сравнены с аналогичными, полученными с помощью уравнений квантовой гидродинамики (гамильтонов случай), теории функционала плотности Кона–Шэма, а также с экспериментом. Во всех сравнениях выявлено хорошее количественное совпадение значений резонансной частоты ЛПР.

### Литература

- [1] Serebrennikov A.M., Continual–quantum plasmonics with kinematical functions: dipolar resonance and nonlocal polarizability of simple metal made nanoparticles // *Opt. Quant. Electron.* – 2019. – т. 51, № 8. – 253.
- [2] Serebrennikov A.M., Superposition continuum mechanics (hydrodynamics) for systems with spin polarization defined evolution // *Mat. Today Commun.* – 2024. – т. 38. – 107945.
- [3] Eguiluz A., Quinn J.J., Hydrodynamic model for surface plasmons in metals and degenerate semiconductors // *Phys. Rev. B.* – 1976. – т. 14, № 4. – с.1347–1361.
- [4] Aharonov Y., Bohm D., Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory // *Phys. Rev.* – 1959. – т. 115, № 3. – с. 485–491.

## СУПЕРПОЗИЦИОННАЯ МЕХАНИКА СРЕД ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ СИСТЕМ, ЭВОЛЮЦИЯ КОТОРЫХ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ СПИНОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Серебренников А. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[al-serebr02@yandex.ru](mailto:al-serebr02@yandex.ru)

Рассматривается мезоскопическая модель на стыке многочастичной квантовой механики, гидродинамики и статистической физики [1]. (I) Декомпозиционный подход последней допускает деление системы на совокупность подсистем по принципу факторизации функции распределения:  $\eta = \eta_1 \eta_2 \dots$  (II) Теория вероятностей дает обобщение теорем сложения и умножения событий в виде бинарной суперпозиции:  $\otimes_{n=1}^N \{P_{A_1 A_2 \dots A_{n-1}}(A_n^\uparrow) + P_{A_1 A_2 \dots A_{n-1}}(A_n^\downarrow)\}$ . (III) Квантовая механика многих тел постулирует способность систем находиться в суперпозиционных состояниях. Комбинирование этих положений позволяет функцию плотности механической системы  $\otimes_{n=1}^N (\rho_n^\uparrow + \rho_n^\downarrow)$  отобразить взаимно однозначно на множество конфигураций  $\rho_\sigma = \int_{\Omega} \Phi(\mathbf{r}, \boldsymbol{\sigma}, t) \Phi^*(\mathbf{r}, \boldsymbol{\sigma}, t) d\Omega$  системы частиц со спином  $1/2$  ( $s = 1/2$ ,  $(2s+1)^N$  – число проекций на выделенное направление для группы из  $N$ -частиц). Введение гипотезного аппарата в части зависимости парциальных плотностей  $\rho_n^\uparrow$ ,  $\rho_n^\downarrow$  от обобщенных координат дает лагранжиан системы. Применение принципа экстремизации действия ведет к  $2^N$ -уравнениям движения. Из них выделяется условие сохранения во времени потенциальности течения обобщенного импульса. На его основе строится детерминантная много конфигурационная волновая функция, удовлетворяющая многочастичному уравнению Шредингера с 4-потенциалом. Областью применения модели идентифицирована плазмоника наночастиц (НЧ) кобальта. С позиции зонной теории спецификой переходных металлов является пересечение  $d$ -зонами уровня Ферми ( $E_F$ ) [2]. В НЧ Со диаграмма плотности состояний расщепляется на две сдвинутые копии, одна из которых лежит ниже  $E_F$  (и все состояния заполнены), вторая пересекает  $E_F$  и заполнена частично. Этим порождается сильное различие в характеристиках рассеяния электронов находящихся в зоне проводимости вблизи  $E_F$ . Семейство спин-вверх электронов обладает низким уровнем рассеяния (большая длина свободного пробега), спин-вниз электроны обладают высоким уровнем (пробег в 10 – 20 раз меньше [2,3]). Наличие представительного числа актов рассеяния с переворотом спина порождает спиновые конфигурации, различающиеся по движению с размерностью их множества  $= 2^N$ , где  $N$  – число частиц в событиях переворота. Методическая часть сформулированного подхода доведена до численно решаемой модели. С ее помощью исследован плазмонный резонанс в сферических НЧ. Аспекты вычислительной сложности адресованы в выступлении.

### Литература

- [1] Serebrennikov A.M., Superposition continuum mechanics (hydrodynamics) for systems with spin polarization defined evolution // Materials Today Communications. – 2024. – т. 38. – 107945.
- [2] Tsymbal E.Y., Pettifor D.G., Perspectives of Giant Magnetoresistance. In Ehrenreich H. and Spaepen F. (Eds): Solid state physics (т. 56). – Academic Press, Boston, 2001. – с. 113–237.
- [3] Bhatta H.L., Aliev A.E., Drachev V.P., New mechanisms of plasmons specific for spin-polarized nanoparticles // Scientific Reports. – 2019. – т. 9, № 1. – 2019.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ РЭЛЕЕВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ИЗДЕЛИЙ, СОЗДАНЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Конюхов В.А.

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской Академии Наук,  
Пермь*

[serovaev@icmm.ru](mailto:serovaev@icmm.ru), [galkina.e@icmm.ru](mailto:galkina.e@icmm.ru), [koniukhov.v@icmm.ru](mailto:koniukhov.v@icmm.ru)

В работе проведено экспериментальное исследование, посвященное применению современных волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе рэлеевского рассеяния [1] к задаче определения остаточных деформаций, возникающих в изделиях, созданных с помощью технологии послойного наплавления, так же известного как FDM/FFF-печать [2].

Распределения остаточных деформаций были получены в результате встраивания ВОД непосредственно в процессе печати образцов для различных термопластичных полимеров: акрилонитрилбутадиенстирола (ABS), полилактида (PLA) и полиэтилентерефталат гликоля (PETG).

Результат определения остаточных деформаций для одного из исследуемых образцов представлен на рисунке 1.

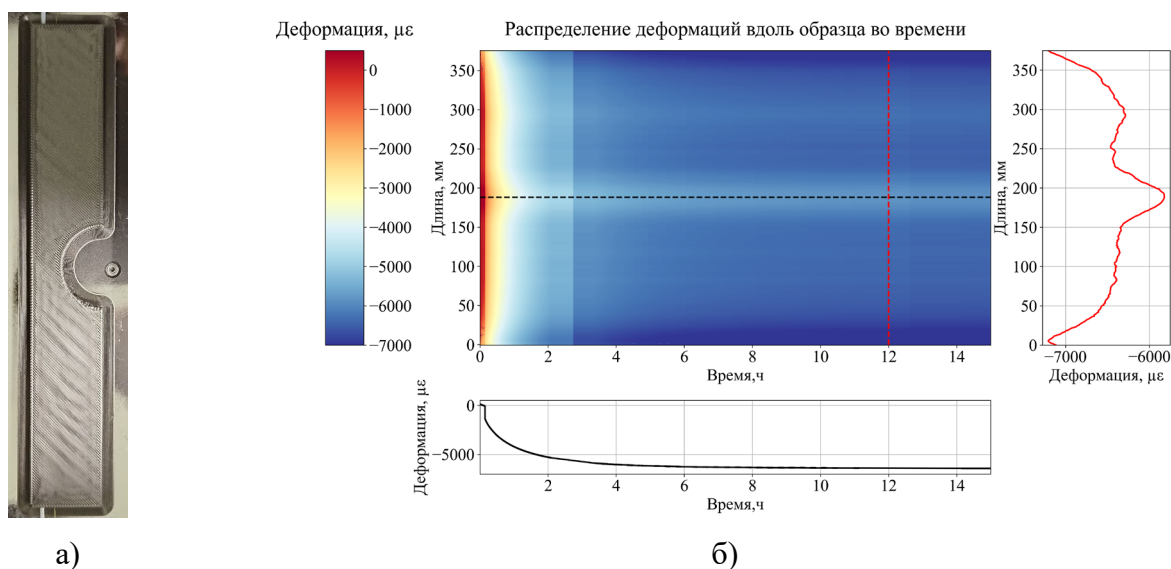


Рисунок 1 — Определение остаточных деформаций образца с вырезом из ABS:

а) внешний вид исследуемого образца, б) результат измерения остаточных деформаций

Анализ результатов показал, что остаточные деформации существенно зависят как от формы, так и от используемого материала. Однако в случае PLA и PETG распределение остаточных деформаций не изменяется по толщине образца.

### Литература

- [1] Wang S., Lasn K., Integration of optical fibre sensors by material extrusion 3-D printing – The effect of bottom interlayer thickness // *Materials & Design*. – 2022. – Т. 221. – 110914.
- [2] Shanmugam V., Pavan M., Babu K., Karnan B. Fused deposition modeling based polymeric materials and their performance: A review // *Polymer Composites*. – 2021. – Т. 42, № 11. – С. 5656–5677.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БРОУНОВСКОЙ ДИНАМИКИ МОЛЕКУЛЫ ДНК В ПОЛЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ

Сираев Р.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[rrsiraev@pstu.ru](mailto:rrsiraev@pstu.ru)

Моделирование динамики отдельной молекулы ДНК в гидродинамических полях представляет интерес в различных отношениях [1]. Настоящая работа является частью исследования, направленного на описание реакции конвективной ПЦР (СРСР) на основе эйлеровой или лагранжевой моделей многофазных сред. Важным входным параметром для такого моделирования являются гидродинамические свойства отдельных молекул, такие как коэффициент гидродинамического сопротивления молекулы. Последний параметр может зависеть от топологии молекул, их ориентации по отношению к течению и др.

Большое значение в динамике полимерных молекул, в частности ДНК, является их топология. Она может быть достаточно сложной с учетом значительного количества степеней свободы: изгиб, скручивание, сжатие. Если интерес представляют относительно короткие молекулы ДНК (несколько сот пар оснований), участвующие в реакции ПЦР, то для гидродинамики имеет значение только способность молекулы к изгибу. Эта способность определяется таким свойством полимерной молекулы как персистентная длина (или сегмент Куна). Персистентную длину  $l_p$  можно рассматривать как характеристику тех масштабов, больше которых теряется память о направлении цепи, или же её можно грубо рассматривать как максимальный участок цепи, остающийся прямым. Оценки  $l_p$  в литературе различны, мы примем данные [2], согласно которым для молекул двухцепочечной ДНК  $l_p = 50$  нм, что соответствует 150 пар оснований, для молекул одноцепочечной ДНК  $l_p = 2$  нм. В моделях броуновской динамики полимерная молекула представляется как цепь, состоящая из последовательности  $N$  шарнирно соединенных жестких сегментов длины  $l_p$ . Концы сегментов – это шарики (бусины), к которым приложены внешние и внутренние силы: сила сопротивления, вычисляемая по формуле Стокса, броуновская сила, обусловленная флуктуациями полей скорости и давления окружающей жидкости, упругие силы, описывающие препятствие изгибу и растяжению цепи. Для исключения взаимопроникновения шариков учитывается взаимодействие между ними на основе модели парного отталкивания Ленарда-Джонса. В реакции ПЦР участвуют короткие участки ДНК: от 150 до 3000 пар оснований. С учетом длины персистенции при моделировании двухцепочечные ДНК могут быть представлены цепями из 1-20 сегментов, а одноцепочечные - из 75-1500 сегментов.

Исследование проводилось численно в пакете ANSYS CFX в трехмерной постановке. Сначала рассчитывались гидродинамические поля скорости и давления, в условиях реакции конвективной ПЦР в наиболее релевантных экспериментальных исследованиях, например [3], где изучалась СРСР в вертикальной цилиндрической полости. Затем проводилось моделирование броуновской динамики молекул ДНК в поле конвективного течения. В результате определялся коэффициент гидродинамического сопротивления молекул.

[1] Monjezi S., Behdani B., et al. Computational Studies of DNA Separations in Micro-Fabricated Devices: Review of General Approaches and Recent Applications // *Advances in Chemical Engineering and Science*. – 2017. – V. 7 – P. 362-392.

[2] Manning G.S. The persistence length of DNA is reached from the persistence length of its null isomer through an internal electrostatic stretching force // *Biophysical Journal*. – 2006. – V. 91, No.10. – P. 3607–3616.

[3] Krishnan M., Ugaz V., Burns M. PCR in a Rayleigh-Bénard Convection Cell // *Science*. – 2002. – V. 298. – P.793.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОУСАЖИВАЕМОЙ ТРУБКИ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБ

Сметанников О.Ю.<sup>1</sup>, Фасхутдинова Ю.Б.<sup>1</sup>, Ильиных Г.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[sou2009@mail.ru](mailto:sou2009@mail.ru), [fub26@mail.ru](mailto:fub26@mail.ru), [gleb@ilinyh.ru](mailto:gleb@ilinyh.ru)

К изделиям, демонстрирующим эффект памяти формы (ЭПФ), относятся термоусаживаемые трубки (ТУТ) из сшитого полиэтилена (СПЭ), часто применяемые для герметизации трубных соединений. ЭПФ заключается в способности материала восстанавливать недеформированное состояние после приложения к нему теплового воздействия [1].

СПЭ проявляет вязкоупругие и гиперупругие свойства. Среди гиперупругих моделей рассмотрены модели Муни-Ривлина, Огдена, Йоха и модель удлиненной трубки. На модельной задаче показано некорректное описание термомеханического поведения образца с помощью модели Муни-Ривлина при деформации более 80%. Среди остальных моделей предпочтение отдано модели Огдена, имеющей минимальное интегральное отклонение от усредненной скорректированной кривой «напряжения-деформации». Вязкоупругое поведение материала описывается с помощью модели Прони с постоянным модулем объемного сжатия. Для совмещения вязкоупругой и гиперупругой моделей использованы модифицированные соотношения Симо [2] и Хольцапфеля [3]. Так как константы гиперупругой модели воспринимаются моделью Прони как параметры «мгновенного» деформирования, соответствующего комнатной температуре, необходимо проводить корректирование параметров гиперупругой модели в соответствии с методикой, предложенной в работе [4].

Рассмотрено новое изделие – ТУТ для внутренней изоляции труб. При ее изготовлении заготовку нагревают, осаживают на специальную матрицу с поперечным сечением лепестковой формы с целью уменьшения габаритов, охлаждают. Полученное готовое изделие помещают внутрь трубы и нагревают, при этом ТУТ благодаря ЭПФ будет стремиться вернуться к недеформированному состоянию и прижаться к внутренней поверхности трубы. Найдены геометрические параметры матрицы, на которую осаживается трубка для приведения ее в нужную геометрическую конфигурацию. Проиллюстрировано изменение расчетной формы заготовки в зависимости от коэффициента снижения габарита изделия для шестилепестковой формы. Выполнено численное моделирование процесса осаживания заготовки на матрицу в программном пакете ANSYS Mechanical ADPL, а также процесса расправления изделия внутри трубы под воздействием температуры и давления.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM- 2023-0006).

### Литература

- [1] Smetannikov O. Yu., Faskhutdinova Yu. B., Subbotin E. V. ANSYS Study of the Shape-Memory Effect in Cross-Linked Polyethylene Products // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics – 2023. – V. 63, №7. – pp. 1138-1154. doi: 10.1134/S0021894422070112
- [2] Simo, J. C. On fully three-dimensional finite strain viscoelastic damage model: Formulation and computational aspects // Computer Methods In Applied Mechechanics and Engineering – 1987. – № 60. – pp. 153-173.
- [3] Holzapfel, G. A. On large strain viscoelasticity: continuum formulation and finite element applications to elastomeric structures // International Journal for Numerical Methods in Engineering – 1996. – № 39. – pp. 3903-3926.
- [4] Сметанников О.Ю., Ильиных Г.В., Фасхутдинова Ю.Б. Порядок идентификации термовязкоупругой модели сшитого полиэтилена с учетом больших деформаций // Научно-технический вестник Поволжья – 2023. – № 12. – с. 110-115.

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОГО ЭПОКСИДНОГО КОМПОЗИТА ЭД-20/10% ТiO<sub>2</sub> ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКЛОВАНИЯ

Смирнов С.В.<sup>1</sup>, Пестов А.В.<sup>2</sup>, Осипова В.А.<sup>2</sup>, Соловьева Я.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург

<sup>2</sup>Институт органического синтеза имени И.Я. Постовского, Екатеринбург

[svs@imach.uran.ru](mailto:svs@imach.uran.ru), [pestov@ios.uran.ru](mailto:pestov@ios.uran.ru), [osipova.sva@gmail.com](mailto:osipova.sva@gmail.com), [yana-soloveva-1998@mail.ru](mailto:yana-soloveva-1998@mail.ru)

Эпоксидные полимеры нашли широкое и разнообразное применение в технике в качестве основы для покрытий, клеев, герметиков, связующих в композиционных материалах и др. В процессе изготовления изделий и их эксплуатации они могут подвергаться механо-термическим воздействиям, вызывающим деформацию приводящую к формированию нежелательных остаточных напряжений и изменению конструктивной прочности. Эпоксиды могут быть модифицированы путем введения твердых упрочняющих компонент, в том числе частиц оксидов, карбидов и др. Полученные таким образом дисперсно-упрочненные эпоксидные композиты обладают, как правило, повышенными прочностными свойствами. В технической литературе можно найти сведения о механических свойствах при комнатной температуре и высокой (свыше 180<sup>0</sup>С) температуре, которая считается экстремальной при эксплуатации элементов конструкций с эпоксидными компонентами. При этом влияние нагрева в диапазон температур вблизи температуры стеклования, в котором возможно протекание процессов старения эпоксидных материалов [1], на механические свойства остается практически неизученным. Целью проведенных исследований было изучить изменение деформационных свойств дисперсно-упрочненного композита на основе эпоксидной диановой смолы ЭД-20 с добавкой 10 масс. % наночастиц TiO<sub>2</sub>. В качестве отвердителя использовали полиэтиленполиамин в соотношении «смола : отвердитель» как 10:1. Для определения влияния упрочнителя на механические свойства проводили также испытания чистой отвержденной эпоксидной смолы.

Сжатие цилиндрических образцов осуществляли на испытательном комплексе для динамического механического анализа DMA Gabo Eplexor 100N при температурах 50, 60 и 70<sup>0</sup>С и скорости деформации в диапазоне от  $3 \cdot 10^{-5}$  до  $6 \cdot 10^{-2}$  сек<sup>-1</sup>. Для определения температуры стеклования использовали опцию Temperature Sweep. В результате исследований было установлено, что в исследованных температурно-скоростных условиях деформации введение упрочняющей добавки 10 масс. % наночастиц TiO<sub>2</sub> незначительно увеличило величину температуры стеклования с 60 до 66<sup>0</sup>С и привело к отсутствию зависимости нормального модуля упругости E от скорости деформации  $\xi$  в отличие от чистой смолы, значения E которой увеличиваются при увеличении скорости деформации. Степень деформации  $\varepsilon$  неоднозначно влияет на зависимость напряжения  $\sigma$  от скорости деформации  $\xi$ : при  $\varepsilon < 0,1$  зависимость  $\sigma(\xi)$  является возрастающей во всем исследованном диапазоне  $\xi$ ; при  $\varepsilon > 0,1$  зависимость  $\sigma(\xi)$  минимум при  $\xi \approx 1 \cdot 10^{-3}$  сек<sup>-1</sup>. Аномальное возрастание напряжения  $\sigma$  при  $\xi < 1 \cdot 10^{-3}$  сек<sup>-1</sup> связано с упрочнением вследствие физического старения, при котором происходит повышение степени поперечной сшивки молекулярных цепей из-за длительного температурного воздействия. При увеличении  $\varepsilon$  указанный эффект проявляется в большей степени.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 24-29-00528).

### Литература

[1] Odegard G.M., Bandyopadhyay A. Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites // J. Polym. Sci. Part B: Polym Phys 49: 1695-1716, 2011 DOI: 10.1002/polb.22384.

## ВЛИЯНИЕ ВЫНОСА МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕДЕНИЕ МГД ПОТОКОВ

Смолянов И.А.<sup>1</sup>, Зиканов О.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург

<sup>2</sup>Мичиганский университет, Мичиган, США

[i.a.smolyanov@gmail.com](mailto:i.a.smolyanov@gmail.com), [zikanov@umich.edu](mailto:zikanov@umich.edu)

В данной работе исследуется влияние конвекции магнитного поля на характеристики проводящего движущегося потока жидкости в прямоугольном канале. Проявления конвекции магнитного поля часто обозначаются как продольный краевой эффект, который оказывает значительное воздействие на поведение потока и, соответственно, на функционирование технических устройств, где данные явления имеют место. Для изучения этого эффекта были разработаны численные модели, предназначенные для решения полных уравнений магнитной гидродинамики. Одна из таких моделей была реализована в программном обеспечении Comsol Multiphysics, где магнитное поле разрешается относительно векторного магнитного потенциала на основе метода конечных элементов. Точность разработанной модели оценивается посредством сравнения с результатами, представленными в статье [1], и отражена на рисунке 1 для обратных значений числа Стюарта  $Q$  в диапазоне 0.1 до 0.4.

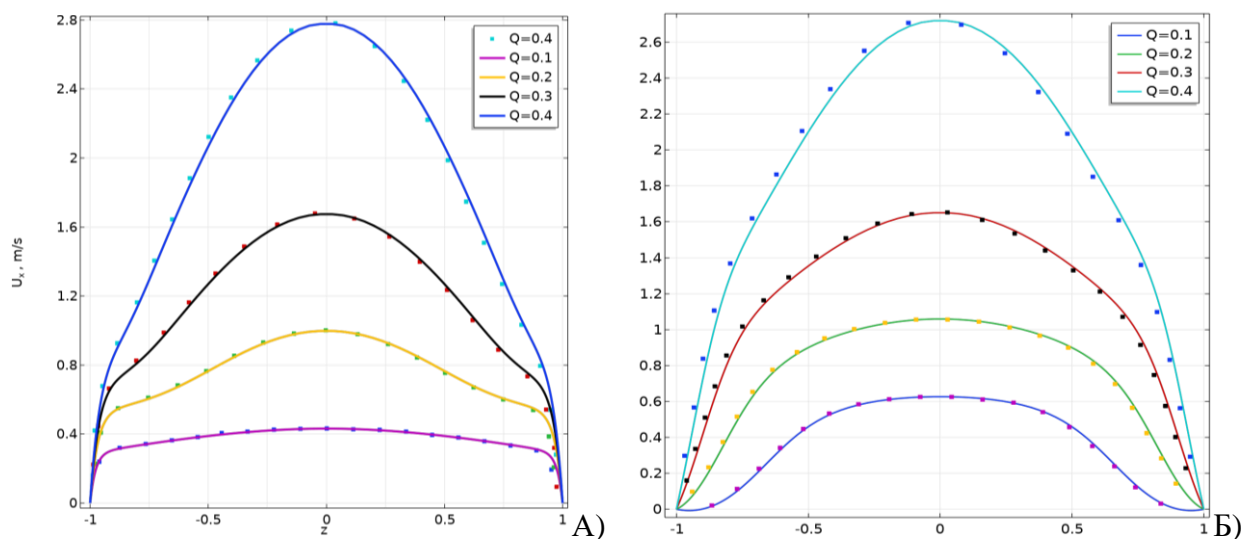


Рисунок 1. Распределение  $x$  компоненты скорости течения в прямоугольном канале вдоль прямых, пересекающих сечение канала на расстоянии А)  $\pi/2$  и Б)  $\pi$  от его начала. Сплошные линии на графиках обозначают расчеты в Comsol, а точки значения из [1].

В данной работе также разработаны модели на основе метода конечных объемов с использованием программы с открытым исходным кодом OpenFOAM. В этих моделях магнитное поле разрешается относительно общей и индуцированной магнитной индукции. Проведен сравнительный анализ разработанных численных моделей. Исследуется изменение поведения потока в зависимости от значений числа Стюарта и магнитного числа Рейнольдса. В ряде режимов наблюдаются образования обратных течений. Кроме того, авторами работы рассматривается изменение характера продольного краевого эффекта при различных гидродинамических нагрузках, а также учитывается конечность магнитной системы

### Литература

[1] V. Bandaru et.al., Simulation of flux expulsion and associated dynamics in a two-dimensional magnetohydrodynamic channel flow // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. – 2015. – т. 29, № 4



## КОНВЕКЦИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ В МОДУЛИРОВАННОМ ВНЕШНЕМ ПОЛЕ

Сморodin Б.Л.

Пермский государственный университет, Пермь

[bsmorodin@yandex.ru](mailto:bsmorodin@yandex.ru)

В жидкостных молекулярных бинарных смесях и коллоидных суспензиях перенос примеси осуществляется благодаря различным механизмам транспорта, таким как конвективный перенос, диффузия, термодиффузия в молекулярных смесях, гравитационная седиментация в коллоидных суспензиях, дрейф заряженной примеси в электрическом поле. В случае конкуренции механизмов переноса, например, при отрицательной термодиффузии (гравитационного оседания) перераспределение примеси приводит к возникновению колебательной конвективной неустойчивости под действием как объемных [1], так и поверхностных [2] сил.

Наличие в распределенной гидродинамической системе собственной частоты  $\omega_0$  ведет к большему по сравнению с классическим уравнением Матье [3] разнообразию возможных типов поведения этих систем при модуляции внешнего поля: гравитационного, теплового, электрического. Среди них отметим: 1) конкуренцию квазипериодических и периодических мод (тепловая конвекция смеси спирт-вода, термоэлектроконвекция); 2) ситуации, когда возмущения синхронного отклика более опасны для устойчивости механического равновесия (конвекция Марангони в смеси спирт-вола), 3) отсутствие в некоторых случаях колебаний субгармонического отклика (электроосмотические течения в переменном электрическом поле), что связано с свойствами симметрии конкретных гидродинамических систем относительно трансляции во времени.

Благодаря квадратичной нелинейности в спектрах нелинейных колебательных течений бинарной смеси присутствуют собственная частота  $\omega_0$  и ее комбинации с внешней частотой  $\Omega$ :  $\Omega \pm \omega_0$ . Нелинейная эволюция течений в модулированных полях может приводить к установлению 1) бегущих волн, модулированных по амплитуде и фазе (частоты  $\Omega$  и  $\omega_0$  несоизмеримы); 2) модулированной конвекции синхронного отклика ( $\Omega = \omega_0$ ); 3) стоячих волн ( $\Omega/2 = \omega_0$ ); либо 4) хаотических колебательных режимов.

Как и в случае маятника Капицы [4] модуляция параметра может стабилизировать неустойчивые состояния. Однако в гидродинамических системах стабилизируется не только механическое равновесие, но и нелинейные режимы стоячих волн (случай конвекции смеси спирт-вода или термоэлектроконвекция).

### Литература

- [1] Jung D., Matura P., Lücke M. Oscillatory convection in binary mixtures: Thermodiffusion, solutal buoyancy, and advection. *Europ. Phys. J. E.* – 2004. – Vol. 15. – p. 293–304.
- [2] Oron A., Nepomnyashchy A.A. Long-wavelength thermocapillary instability with the Soret effect// *Phys. Rev. E.* – 2004. – Vol. 69. – 016313.
- [3] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Т. I. Механика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 224 с.
- [4] Капица П. Л. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса// *ЖЭТФ*, 1951. – Т. 21, вып. 5. – с. 588—597.

## ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО СДВИГА ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КАК КРИТИЧЕСКОГО ЯВЛЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОГО КОЛЛЕКТИВНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ АНСАМБЛЕЙ ДЕФЕКТОВ

Соковиков М.А.<sup>1</sup>, Симонов М.Ю.<sup>2</sup>, Чудинов В.В.<sup>1</sup>, Оборин В.А.,  
Уваров С.В.<sup>1</sup>, Наймарк О.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

sokovikov@icmm.ru

В данном исследовании изучается один из механизмов локализации пластической деформации обусловленный структурными переходами в ансамблях дефектов мезоуровня при различных видах нагружения [1]. Эксперименты по изучению локализации пластического сдвига проводились при динамическом нагружении образцов на стержне Гопкинсона - Кольского и при высокоскоростном внедрении индентора в пластину [2-7]. Температурные поля в процессе деформирования исследовались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Осуществлены динамические испытания образцов на разрезном стержне Гопкинсона - Кольского с применением высокоскоростной фотокамеры Photron FASTCAM SA-Z 2100K и DIC технологии. Экспериментально определены поля сдвиговых деформаций и ширина области локализации. Микроструктурный анализ, проведенный с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа, показал коррелированное поведение ансамбля дефектов, которое может быть классифицировано, как структурный переход, обеспечивающий локализацию деформации. Данные экспериментальных исследований и численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов при реализованных условиях нагружения обусловлен коллективными процессами в дефектной структуре материалов.

### Литература

- [1] Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – т. 6, № 4. – с. 45-72.
- [2] Sokovikov M., Uvarov S., Simonov M., Oborin V., Chudinov V., Naimark O. Plastic strain localization mechanism in AlMg alloys as a result of jumpwise processes in the defect structure of materials // Procedia Structural Integrity. - 2023. – V. 47. – p. 693–697.
- [3] Соковиков М.А., Симонов М.Ю., Чудинов В.В., Уваров С.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Экспериментальное и теоретическое исследование структурных механизмов и эффектов локализации пластической деформации в сплаве АМг6 при динамическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – №4. – с.110-120.
- [4] Sokovikov M.A., Uvarov S.V., Simonov M.Yu., Chudinov V.V., Naimark O.B. Metastability, adiabatic shear bands initiation and plastic strain localization in the AlMg6 alloy under dynamic loading // Frattura ed Integrità Strutturale. - 2024. - V.68. - p.255-266.
- [5] Sokovikov M.A., Simonov M.Yu., Chudinov V.V., Uvarov S.V., Oborin V.A., Naimark O.B. Plastic strain localization in the AlMg6 alloy under dynamic loading // Procedia Structural Integrity. – 2024. – V. 65. – p.265-274.
- [6] Наймарк О.Б., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Оборин В.А., Ледон Д.Р. Устройство для испытаний на сжатие образца материала на стержне Гопкинсона- Кольского // Патент на изобретение № 2773418. - 2022. - Зарегистрировано 03.06.2022. - Заявка № 2021123595 от 05.08.2021.
- [7] Наймарк О.Б., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Оборин В.А., Ледон Д.Р. Устройство для испытания на растяжение образца из хрупкого материала на стержне Гопкинсона-Кольского// Патент на изобретение № 2808953. - 2023. - Зарегистрировано 05.12.2023. - Заявка № 2023117325, 30.06.2023 от 30.06.2023.

## **ФАРАДЕЕВСКОЕ ВРАЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ДЖЕТОВ**

Соколов Д.Д., Юшков Е.В.

*Физический факультет МГУ, Москва  
sokoloff.dd@gmail.com*

Современная наука знает о напряженности и конфигурации магнитных полей в дисках спиральных галактик прежде всего из анализа данных о фарадеевском вращении синхротронного излучения релятивистских электронов в этих дисках. Среди небесных тел масштаба галактик, кроме дисков галактик, интерес вызывают струи (в астрономической терминологии – джеты), истекающие из центральных частей некоторых галактик. В них тоже наблюдается синхротронное излучение и магнитные поля, однако их конфигурация существенно отличается, в силу различия геометрий, от конфигурации магнитных полей дисков. В докладе рассматривается, как нужно модифицировать методы интерпретации фарадеевского вращения, обычные при исследовании дисковых систем, чтобы они стали применимыми и для джетов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КАПЛЮ ВОДЫ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Соколов Е.А.<sup>1</sup>, Калюжная Д.А.<sup>1</sup>, Ряполов П.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, Курск

[evgeniysokolov1@yandex.ru](mailto:evgeniysokolov1@yandex.ru), [kalyuzhnaya.dariya@yandex.ru](mailto:kalyuzhnaya.dariya@yandex.ru), [r-piter@yandex.ru](mailto:r-piter@yandex.ru)

Магнитные эмульсии представляют собой жидкую композиционную среду, одна из фаз которой представлена магнитным нанокolloидом. Уникальной особенностью данных сред является наличие выраженных магнитных свойств [1, 2]. Магнитные эмульсии являются перспективным материалом для адресной доставки лекарств [3]. Их производство может быть осуществлено различными способами, например механическое диспергирование [4] или эмульгирование с помощью микрофлюидных чипов [5]. Получение магнитных эмульсий обычно осуществляется путем диспергирования магнитных жидкостей на основе углеводов в воде [2]. Менее распространены и в гораздо меньшей степени изучены эмульсии, в которых дисперсная фаза образована водой, а дисперсионная среда – углеводородной магнитной жидкостью.

В данной работе рассмотрено экспериментальное образование эмульсий с использованием магнитной жидкости в вертикальном плоском канале под воздействием неоднородного магнитного поля. Оно оказывает фокусирующее действие и способствует управлению размером капель эмульсии и их динамикой. Источник магнитного поля представлен в виде комбинации соленоида, сверху которого располагается кольцевой постоянный магнит. Поставлен эксперимент и проведено моделирование системы в программном пакете FEMM. Детально описаны силы, действующие на каплю воды в магнитной жидкости.

Результаты способствуют дальнейшей разработке детальных механизмов образования эмульсий на основе магнитной жидкости, управления их размерами в режиме реального времени.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-22-00309)

<https://rscf.ru/project/24-22-00309/>.

### Литература

- [1] X. Huang, M. Saadat, M. A. Bijarchi, M. B. Shafii, "Ferfluid double emulsion generation and manipulation under magnetic fields," *Chemical Engineering Science*, vol. 270, pp. 118519, 2023.
- [2] S. A. Suslov, "Peculiarities of Convective Heat and Mass Transfer in Magnetic Nanofluids," *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 145, No. 3, pp. 030801, 2023.
- [3] E. Elkalla, S. Khizar, Z. Ait-Touchente, N. Lebaz, M. Hangouët, G. Raffin, N. Zine, A. Elaissari, "Synthesis and characterization of silica-coated oil-in-water (O/W) magnetic emulsion," *Emergent Materials*, vol. 6, No. 6, pp. 2027-2039, 2023.
- [4] A. R. Zakinyan, A. A. Zakinyan, "Rotating field induced torque on ferrofluid emulsion with deformable dispersed phase microdrops," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 314, pp. 112347, 2020.
- [5] S. Kahkeshani, D. Di Carlo, "Drop formation using ferrofluids driven magnetically in a step emulsification device," *Lab on a Chip*, vol. 16, No. 13, pp. 2474-2480, 2016.

## УСКОРЕННАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ

Соломонов Д.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[solomonov1198@yandex.ru](mailto:solomonov1198@yandex.ru)

Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции ответственных узлов газотурбинного двигателя требует наличия экспериментальных данных об их усталостной прочности. Классический метод определения предела выносливости требует проведения длительных трудоемких испытаний. Существует методика ускоренной оценки предела выносливости IRT методом, которая позволяет значительно сократить трудоемкость усталостных испытаний на этапе проектирования новой конструкции [1-3]. Эта ускоренная методика разработана для стандартных металлических образцов. Целью данной работы является распространение данной методики на конструктивно-подобные элементы из ПКМ.

Объектом исследования в настоящей работе является типовой конструктивный элемент: пластинка прямоугольной формы с отверстием. Он изготовлен из слоистого углепластика на основе углеродной ткани и эпоксидного связующего.

Методика экспресс-оценки предела выносливости пластины опирается на использование IRT-метода. Этот метод предполагает блочное циклическое нагружение исследуемого образца с регистрацией температуры на его поверхности [3-5].

В блоках с амплитудой нагрузки, превышающей предел выносливости, стабилизационное значение температуры и скорость возрастания температуры в начале блока резко увеличиваются. Этот эффект связан с активизацией тепловыделения при появлении усталостных повреждений. Согласно идее IRT-метода, описанной в работах [1,2], эти зависимости могут быть аппроксимированы двумя прямыми, пересечение которых соответствует пределу выносливости.

В результате данного исследования отработана ускоренная методика оценки предела выносливости для типовой конструкции из ПКМ с отверстием. Трудоемкость данных испытаний значительно ниже, чем стандартных усталостных испытаний; значительно меньше количество испытываемых образцов (в пределе - только один). Следует подчеркнуть, что проводимые IRT-методом испытания не заменяют стандартные усталостные испытания, но позволяют сократить их объем.

### Литература:

- [1] Montesano J., Fawaz Z., Bougherara H. Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite // Composite Structures. – 2013. – 97. – pp. 76–83
- [2] De Giorgi, M., Nobile, R., Palano, F. kf Evaluation in GFRP Composites by Thermography. Appl. Sci. 2021, 11, 5200. <https://doi.org/10.3390/app11115200>
- [3] Соломонов Д.Г., Нихамкин М.Ш., Семенов С.В., Торопицина А.В. Тепловое состояние композитных образцов с ребрами жесткости при высокочастотном циклическом нагружении//Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. №76 (2024). С.41-50.
- [4] Solomonov, D., Nikhamkin, M. (2024). Fatigue Strength of Typical Structural Elements Made of Polymer Composite Material. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.
- [5] Соломонов Д.Г., Нихамкин М.Ш., Ускоренная оценка усталостной прочности конструктивных элементов из полимерных композиционных материалов// Конструкции из композиционных материалов № 2, 2024. С. 3-8.

## ИСПЫТАНИЯ ДЕМПФЕРА НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРА В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИИ

Сомов С.А.<sup>1</sup>, Косков М.А.<sup>1</sup>, Иванов А.С.<sup>1</sup>, Степанов Г.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии  
элементоорганических материалов, Москва  
[somov.s@icmm.ru](mailto:somov.s@icmm.ru)

Широкое применение электронного оборудования требует разработки и совершенствования средств защиты от ударных и вибрационных воздействий [1]. Для этой цели используются демпферы из высокоэластичных материалов, таких как силиконовая резина [2–3]. Особый интерес представляют ферроэласты — силиконовые композиты с ферромагнитным порошковым наполнителем. Их свойства можно изменять внешним магнитным полем, что делает их перспективными для пассивных и активных систем виброзащиты [4].

### Конструкция.

Демпфер (рис. 1) состоит из двух цилиндров с отверстием в центре (2), размещённых между тремя неодимовыми магнитами (3), расположенными разноимёнными полюсами. Магниты создают пондеромоторные силы, воздействующие на магнитный эластомер. Конструкция фиксируется на направляющем стержне (4) резьбовыми шайбами, служащем также основой для крепления грузов. В альтернативном варианте магниты заменены на алюминиевые диски аналогичных размеров. Вся конструкция заключена в корпус из PETG, напечатанный на 3D-принтере Tevo Tornado, для защиты и устойчивости.

### Проведение испытаний.

Испытания проводились с магнитной и немагнитной системами демпфера на вибростенде, создающем вибрации до 1000 Н в диапазоне 2 Гц–5 кГц. Датчики для измерения вибраций крепились к металлической плите и грузу на направляющем стержне с помощью цианакрилового клея. Испытания проводились по единому сценарию, включающему изменение частоты и ускорения.

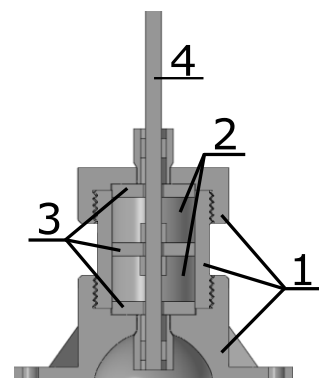


Рис. 1 Конструкция демпфера: 1 – пластиковый корпус, 2 – опытный образец (эластомер), 3 – неодимовые магниты, 4 – направляющий стержень

### Результаты испытаний.

Результаты представлены в виде амплитудно-частотных (АЧХ), фазово-частотных характеристик (ФЧХ) и коэффициента передачи (отношения амплитуд выходного и входного сигналов). Магнитное поле значительно влияло на АЧХ: резонансная частота увеличивалась с 25 Гц до 30 Гц, а коэффициент передачи уменьшался с 2.1 до 1.6. Однако на частотах выше резонансной ( $\omega > \omega_{рез}$ ) эффективность магнитной системы снижалась, а при частотах выше 1500 Гц различия становились незначительными.

### Литература

- [1] ГОСТ 24346-80 // М.: Стандартиформ, 2010. - 28 с.
- [2] Мартин Дж. М., Смит У. К. Производство и применение резинотехнических изделий. // СПб.: Профессия, 2006. - 480 с.
- [3] Сергаева М. Ю., Цисс В. Г. Обоснование работоспособности виброзащиты систем авиационного оборудования // Омский научный вестник. Механика, машиностроение. - 2005. - т. 30. № 1.
- [4] Райхер Ю. Л., Столбов О. В. Деформация эллипсоидального образца феррогеля в однородном магнитном поле // Прикладная механика и техническая физика. - 2005. - т. 46. № 3. - с. 153 – 164.

## ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА ИНТЕРФЕРОГРАММ

Сомов С.А.<sup>1</sup>, Иванов А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
[somov.s@icmm.ru](mailto:somov.s@icmm.ru)

Процессы тепломассообмена в природе и технике зависят от конвекции жидкостей и газов [1]. Для их обобщения используются функциональные зависимости безразмерных гидродинамических параметров, учитывающие влияние вязкости, диффузии и теплопроводности. Эти универсальные зависимости позволяют прогнозировать характеристики потоков.

Работа посвящена экспериментальному исследованию термоконцентрационной конвекции газовых смесей в закрытой полости в присутствии фазовых переходов одного из компонентов (испарение и конденсация). Мы исследовали две смеси: сухой воздух с водяным паром и сухой воздух с парами ундекана, что важно для понимания атмосферных явлений и карбонизации топлива в двигателях внутреннего сгорания.

### Экспериментальная установка.

Конвективный поток возникает в измерительной ячейке параллелепипедной формы длиной 320 мм и квадратным сечением  $15 \times 15$  мм, параметры установки рассчитаны и представлены в работе [2]. Верхняя и нижняя стенки ячейки представляют собой медные теплообменники, а боковые стенки изготовлены из текстолита. Теплообменники состоят из медных пластин с впаянными трубками, соединенными с жидкостным термостатом. Внешняя теплоизоляция обеспечена неорганической ватой.

### Результаты и выводы.

Мы получили три массива данных из независимых экспериментов. Первый массив описывает тепловую конвекцию в сухом воздухе при температуре  $0...80^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении 748 мм рт. ст. Два других массива касаются термоконцентрационной конвекции в смесях воздух-вода и воздух-ундекан.

Эксперименты с сухим воздухом были необходимы для проверки установки и методов измерения. Они подтвердили высокую чувствительность термопар и правильную работу измерительной системы.

Наиболее важным было сравнение поведения сухого воздуха и его смеси с парами воды и ундекана. Это показало, что термоконцентрационная конвекция в газовой смеси начиналась при меньшем перепаде температур  $\Delta T$ , чем в сухом воздухе при той же средней температуре  $T_0$ . Эффективное число Рэлея для газовой смеси  $Ra_E$  всегда больше теплового числа Рэлея для сухого воздуха  $Ra_T$  при тех же условиях.

Экспериментальные данные для воды и ундекана были использованы для нахождения зависимости  $\alpha(T)$ . Также были предприняты попытки обработки интерферограмм с верификацией результатов с использованием численных методов.

### Литература

- [1] Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемых жидкостей. // М.: Наука. - 1972.  
[2] Somov S. A., Ivanov A. S. Experimental setup for studying thermosolutal convection in moist air // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019.

## ПРИЛОЖЕНИЕ «РОТОРНОГО» СПОСОБА ОПИСАНИЯ ВРАЩЕНИЯ К ЗАДАЧЕ О ЗАТЯГИВАНИИ В РЕЗОНАНС РАЗГОНЯЕМОГО РОТОРА

Сорокин Ф.Д.<sup>1</sup>, Кирюхин А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва  
[sorokinfd@bmtu.ru](mailto:sorokinfd@bmtu.ru)

При разгоне ротора на некоторых режимах возникает неприятное и опасное явление захвата критической частоты [1]. Мощность двигателя при этом тратится не на разгон ротора, а на рост амплитуды поперечных колебаний. При неудачном стечении обстоятельств такое явление может привести к аварии или даже разрушению ротора. Аналогичные явления возможны и при торможении ротора, когда двигатель отключен. Энергия, накопленная вращающимся ротором, внезапно начинает перетекать от одной степени свободы (осевого поворота) к другим (поперечным перемещениям и поворотам). Объяснить это сугубо нелинейное явление удастся только с использованием точного трехмерного описания вращения.

Трудность трехмерного описания вращения заключается в наличии ограничений на величину поворота. Для углов Эйлера угол нутации ограничен величиной  $180^\circ$ , для углов Крылова предельный угол составляет всего  $90^\circ$ , вектор Родрига не позволяет перейти рубеж  $180^\circ$ , длина вектора Эйлера ограничена величиной  $360^\circ$  [2]. Существуют способы обхода отмеченных ограничений, каждый из которых имеет свои недостатки. Например, кватернионы увеличивают количество кинематических параметров до четырех (вместо трех), что приводит к необходимости дополнять систему уравнений условием связи и, возможно, множителем Лагранжа. Использование компонентов матрицы поворота в качестве кинематических параметров увеличивает количество связей до шести.

Для преодоления указанных проблем в [3] разработан «роторный» способ описания вращения, который разделяет большой поворот на два: поворот вокруг фиксированной продольной оси и поворот вокруг неизвестной поперечной оси. Величина первого поворота ничем не ограничена. Величина второго поворота не должна превышать  $360^\circ$ , что для роторных систем выполняется всегда. Целью доклада является показать, что «роторный» способ описания вращения позволяет достаточно просто смоделировать процесс разгона ротора и не столкнуться с ограничениями. Продемонстрированы рассчитанные движения с затягиванием в резонанс (захват) и движения с быстрым прохождением критических режимов вращения без захвата. Численные результаты проконтролированы по закону сохранения энергии, отклонения от которого не превысили  $10^{-7}$  в относительных единицах.

### Литература

- [1] Томчин Д.А. Алгоритмы управления прохождением через зону резонанса в мехатронных вибрационных установках. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.11.16. Санкт-Петербург, Институт проблем машиностроения РАН, 2006, 23 с.
- [2] Жилин П.А. Векторы и тензоры второго ранга в трехмерном пространстве. — СПб.: Нестор, 2001. — 275 с.
- [3] Сорокин Ф.Д. Новый способ описания больших поворотов для задач роторной динамики // Проблемы машиностроения, 2019, Выпуск № 7, с. 30 – 37.



## ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СЛОИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ И УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Староверов О.А., Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И., Сивцева А.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[ostaroverov@pstu.ru](mailto:ostaroverov@pstu.ru), [wildemann@pstu.ru](mailto:wildemann@pstu.ru), [cem\\_mugatarov@mail.ru](mailto:cem_mugatarov@mail.ru), [cem\\_sivtseva@mail.ru](mailto:cem_sivtseva@mail.ru)

В работе представлены результаты исследования изменения прочностных и деформационных характеристик образцов стеклотекстолита ВФТ-С со схемами укладки армирующих слоев [0/90] и [±45] при различных режимах предварительных циклических и низкоскоростных ударных воздействий. Рассмотрено влияние различных уровней амплитуды предварительного циклического растяжения с коэффициентом асимметрии  $R=0,1$  на механическое поведение стеклопластика. Построены диаграммы изменения относительного значения остаточной динамической жесткости композитов в ходе усталостных испытаний [1-3]. Отмечено, что повышение амплитуды нагружения приводит к большему снижению динамической жесткости композитов как со схемой армирования [0/90], так и [±45]. По результатам статических испытаний на растяжение после предварительных циклических воздействий различной продолжительности определены остаточные значения пределов прочности и модулей Юнга рассматриваемого стеклопластика. Отмечен нелинейный характер изменения остаточных прочностных и деформационных свойств композитов в зависимости от продолжительности циклического воздействия. Установлено, что при меньшей амплитуде предварительного циклического растяжения композита со схемой армирования [0/90] происходит меньшее снижение модуля Юнга, однако изменение предела прочности является более значительным. Для стеклопластика со структурой [±45] повышение амплитуды предварительного циклического воздействия не оказало существенного влияния на остаточную статическую прочность. В опытах на сжатие после локального удара падающим грузом в широком диапазоне энергий 10 - 60 Дж выявлен трехстадийный характер изменения остаточной прочности стеклотекстолита со схемами армирования [0/90] и [±45]. На первой стадии (в диапазоне энергий удара до 15 Дж) изменение предела прочности материала не наблюдается. На второй стадии (в диапазоне энергий от 20 до 50 Дж) происходит снижение значения остаточной прочности, при этом для композита со схемой армирования [0/90] оно является более значительным. Прочностная характеристика стеклопластиков для обеих схем армирования на третьей стадии (энергия удара более 50 Дж) достигает установившегося уровня и практически не изменяется. Определены характерные значения энергии предварительных воздействий, соответствующие границам стадий ударной чувствительности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (No FSNM-2024-0013).

### Литература

- [1] Staroverov O.A., Mugatarov A.I., Yankin A.S., Wildemann V.E., Description of fatigue sensitivity curves and transition to critical states of polymer composites by cumulative distribution functions // Fracture and Structural Integrity. – 2023. – Vol. XVII, – Iss. 63. – с. 91-99.
- [2] Staroverov O., Mugatarov A., Kuchukov A., Strungar E., Chebotareva E., Sivtseva A., Wildemann V., Influence of proportional multiaxial fatigue loading on the residual mechanical properties of glass-reinforced plastic pipes // Engineering Failure Analysis. Part B. – 2024. – Vol. 163, – Iss. 108586.
- [3] Wildemann V., Staroverov O., Strungar E., Mugatarov A., Kuchukov A., Mechanical Properties Degradation of Fiberglass Tubes during Biaxial Proportional Cyclic Loading // Polymers. – 2023. – Vol. 15, – Iss. 9. – P. 1-22.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОТЕКАНИЯ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ В СИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ  
С ОДНИМ И ДВУМЯ ЩЕЛОЧНЫМИ КАТИОНАМИ**

Старцев Ю.К.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации  
[startsevyk@spbguga.ru](mailto:startsevyk@spbguga.ru)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет [startsevyuk@yahoo.com](mailto:startsevyuk@yahoo.com),

Механическая релаксация в неорганических стеклах исследуется давно (первые исследования, по-видимому, были выполнены еще в работах Кольрауша [1], изучавшего релаксацию напряжений в кварцевых нитях электрометров). Причина столь длительного интереса к этой проблеме объясняется тем, что исследование релаксации напряжений имеет большое практическое значение для решения задач отжига и закалки стеклянных изделий. Изложенные в [2] основы исследования релаксации напряжений на устройстве, названном релаксометром, в неорганических стеклах создали хорошую базу для целого ряда работ [3]. Накопленный при их выполнении опыт работы на релаксометре был кратко изложен в [4].

В данном сообщении автор приводит достаточно подробное описание усовершенствованной экспериментальной методики измерения релаксирующих напряжений и вычисления величин кинетических параметров релаксации напряжений от подготовки образцов до обработки результатов. Кроме того, в докладе будут приведены результаты исследования, выполненного как на нескольких промышленных стеклах, так и на специально синтезированных стеклах разреза  $(1-x)\text{Na}_2\text{O}-x\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-3\text{SiO}_2$  и приведено краткое обсуждение наблюдаемых температурных и концентрационных зависимостей значений времен релаксации напряжений и параметра ширины спектра времен их релаксации. На основе анализа ошибок аппроксимации экспериментальных результатов уравнением дробной экспоненты сделан вывод об адекватности такого описания для исследованных стекол в изученном интервале напряжений и температур.

На примере результатов, полученных на образцах, изготовленных в пламени разных газовых горелок, показано, что некоторых из щелочесодержащих стекол средняя величина отношения вязкости ко времени релаксации и разброс значений параметра ширины спектра времен релаксации могут изменяться. По нашему мнению, это связано с тем, что обычный сетевой газ, применяемый в большинстве стеклодувных мастерских, содержит, кроме всего прочего, некоторое количество воды. Наибольшее количество воды содержится, видимо, при использовании пламени кислородно-водородной горелки. Значительно меньше содержание воды в смеси сжиженных пропана-бутана из баллона. Более надежные значения можно получить на образцах, сделанных непосредственной вытяжкой нити из расплава и одновременной намоткой цилиндрической пружины на графитовую оправку подходящего диаметра.

#### Литература

- [1] Kohlrausch F. Über die elastische Nachwirkung bei der Torsion // Ann. Phys. and Chemie (Poggendorff). Zweite Serie 1863. Bd. 119. S. 337-368.  
[2] Rekhson S.M., Mazurin O.V. Stress and structural relaxation in  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$  glass // J. Amer. Ceram. Soc. 1974. Vol. 57. No 7. P. 327-328.  
[3] Мазурин О.В., Дамдинов Д.Г., Старцев Ю.К. Расчет релаксации напряжения в нестабилизированном стекле при несоблюдении принципа термореологической простоты // Физ. и хим. стекла. 1988. Т. 14. № 4. С. 535-542.  
[4] Старцев Ю.К. Особенности исследований кинетики релаксации напряжений в стеклах с помощью релаксометра // Физ. и хим. стекла. 2003. Т. 29. № 1. С. 76-92.

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ СТЕКЛА, ИЗМЕНЁННЫХ ИОННЫМ ОБМЕНОМ.

Старцев Ю.К.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации  
[startsevyk@spbguga.ru](mailto:startsevyk@spbguga.ru)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет [startsevyuk@yahoo.com](mailto:startsevyuk@yahoo.com),

Ионообменная обработка щелочесодержащих стекол нашла широкое применение в современной технике. Много лет такая обработка использовалась для целей упрочнения стекла для транспортных средств. Более интересным оказалось применение ионного обмена (ИО) поверхностных слоев стекла в расплавах солей для создания на стеклянных подложках волноводных структур для целей оптоэлектроники. При такой обработке на поверхности стекла образуются градиентные слои практически всех физических свойств: показателя преломления, плотности, микротвердости и др., - параметры которых зависят от температуры и продолжительности ИО, свойств стекла-матрицы и от поляризуемостей и размеров катиона, вводимого в структуру стекла. Разработка и создание модели, позволяющей количественно точно воспроизводить эти распределения очень важно как для конструкционной оптики транспортных средств, так и для оптоэлектроники, поскольку очевидным образом определяет эффективность работы устройств.

Успех моделирования градиентных структур на поверхности стекла требует детального знания характеристик, как процессов диффузии, так и тех процессов релаксации свойств стекла, которые протекают в таких стеклах после ИО. Анализ и исследование этих процессов завершились созданием модели, вполне адекватно описывающей экспериментально измеряемые свойства модифицированных слоев [1-3]. Наиболее близкую к излагаемой ниже модели предложили Гелдер Д. с сотр. [4], очень скупно обосновав применение модели Тула-Нарайанасвами [5, 6], которую развил и автор, расширив ее применение на неизоконцентрационные среды типа стекла после ИО. Такая обработка поверхностных слоев стекла в расплавах солей приводит к тому, что в дополнение к структурной и механической релаксации свойств стекла следует учитывать и координационную релаксацию. Полноценный учет перечисленных процессов в разработанной модели позволил добиться количественного согласия с экспериментом, выполненным как автором, так и независимыми специалистами других лабораторий и учреждений.

### Литература

- [1] Мазурин О.В., Старцев Ю.К. Метод расчета напряжений в ионообменных стеклах с учетом структурной и механической релаксации // Тез. докл. Всес. симп. "Релаксационные явления в неорганических стеклах". Тбилиси. 1984. С. 27-28.
- [2] Startsev Yu.K. Influence of structural relaxation on changes in properties of ion-exchanged glasses // Proc. XIV<sup>th</sup> Intern. Congr. on Glass. New-Delhi. 1986. V. 2. P. 363-369.
- [3] Старцев Ю.К., Мазурин О.В. Расчет свойств и напряжений в слоях стекла, модифицируемых ионным обменом. 1. Основные положения модели // Физ. и хим. стекла. 1994. Т. 20. № 4. С. 467-482.
- [4] Gelder D., Unwin G., Weichers J. Stress prediction and measurement in chemical toughening // Fundamentals of the glass manufacturing process. Proc. 1<sup>st</sup> Conf. European Soc. Glass Sci. and Technol. GB. Sheffield. 1991. P. 104-107.
- [5] Tool A.Q. Relation between inelastic deformability and thermal expansion of glass in its annealing range // J. Amer. Ceram. Soc.. 1946. V. 29. N 9. P. 240-253.
- [6] Narayanaswamy O.S. A model structural relaxation in glass // J. Am. Ceram. Soc., 1971. V. 54. No 10. P. 491-498.
- [7] Старцев Ю.К. Влияние совместного протекания структурной, механической и координационной релаксации на изменение свойств слоев стекла, модифицированных ионным обменом // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2000. Т. 64. № 9. С. 1767-1775.

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Статник Е.С.<sup>1,2</sup>, Лумба Л.Т.<sup>1</sup>, Конев С.Д.<sup>1</sup>, Салимон А.И.<sup>1,2</sup>, Корсунский А.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), Москва

<sup>2</sup>Московский Авиационный Институт (МАИ), Москва

[eugene.statnik@skoltech.ru](mailto:eugene.statnik@skoltech.ru)

Проектирование сложных и ответственных изделий, таких как детали планеров самолетов, газотурбинных двигателей и автомобилей требует значительного объема численного моделирования и оптимизации конструкции для обеспечения жесткости, прочности и деформационного поведения при статическом, динамическом и циклическом нагружении. Применение вычислительных подходов существенно усложняется появлением новых материалов, включая аддитивно произведенные металлические (АПМ) и полимерные композиционные материалы (ПКМ), а также гибридные объемно-ячеистые структуры. Это связано с отсутствием точных данных о свойствах материалов или их значительной неопределенностью, которая обусловлена сложной многопараметрической и многомасштабной природой современных производственных технологий. Использование чрезмерно консервативных коэффициентов запаса прочности приводит к неэффективным проектным решениям, а применение приблизительных значений свойств материалов, полученных в ходе базовых испытаний на уровне стандартных образцов («свидетелей»), может вызывать отказы на поздних этапах проектирования.

В данной работе представлено применение новой парадигмы проектирования – РЭК: Расчетно-Экспериментальная Корреляция. Подход РЭК предполагает уточнение параметров материала, используемых в вычислительной модели путем сопоставления результатов экспериментальных испытаний на каждом уровне проектирования, от миниатюрных элементов структуры материала до представительных образцов, компонентов и узлов. Изменение полей деформаций в ходе нагружения определяются методом цифровой корреляции изображений (ЦКИ) на основе бесконтактной видео записи объекта и используются в качестве целевых данных для калибровки полей деформации, полученных методом конечных элементов, посредством уточнения параметров материала.

Последовательность применения подхода РЭК демонстрируется на примере использования программного обеспечения с открытым исходным кодом *NCorr* для обработки экспериментальных данных методом ЦКИ, а также оптимизационного инструмента *iSight* в среде *ABAQUS*. В качестве примера рассмотрено уточнение модели упругопластического поведения алюминиевого сплава Д16 при нагружении трехточечным изгибом балки прямоугольного сечения. На начальном этапе эволюция поля деформаций моделировалась с использованием приближенных значений модуля Юнга и кривой деформационного упрочнения. Затем модель итеративно уточнялась до достижения соответствия полю деформации, полученному экспериментально с помощью ЦКИ. На основе проведенного анализа делаются некоторые заключения о применении РЭК в конструировании.

### Литература

- [1] Lucynda T. Lumba *et al.*, Rational Experimental-Computational Correlation for Design Optimization in Aerospace Materials Engineering – A Case Study. *Front. Mater.* (*submitted*)

## О РАЗДЕЛЕНИИ МАСШТАБОВ В ТУРБУЛЕНТНОЙ КОНВЕКЦИИ

Степанов Р.А.<sup>1</sup>, Васильев А.Ю.<sup>1</sup>, Сухановский А.Н.<sup>1</sup>, Кузанын К.М.<sup>2</sup>, Клиорин Н.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

<sup>2</sup>*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва*

<sup>3</sup>*Ben-Gurion University of the Negev Beer-Sheva Israel  
[rodion@icmm.ru](mailto:rodion@icmm.ru)*

В данной работе рассматривается задача разделения масштабов в теории турбулентности, решение которой необходимо для построения моделей замыкания уравнений среднего поля. Это исследование является частью проекта, направленного на уточнение моделей МГД динамо в части учета механизмов генерации магнитных полей за счет турбулентных пульсаций. В результате были численно и экспериментально изучены свойства конвективной турбулентности в прямоугольной области при числах Рейля от  $10^8$  до  $10^9$  и числе Прандтля  $Pr=6.1$  в условиях, когда нижняя граница однородно нагревается, а верхняя является свободной, что обеспечивает квазистационарный отток тепла. В работе получены статистические данные о спектральных и корреляционных свойствах турбулентных полей, которые проясняют связь между крупномасштабными и мелкомасштабными структурами. В результате проведенного анализа предложена параметризация двучечного корреляционного тензора через «медленные» и «быстрые» пространственные и временные переменные. Показано, что при определенных условиях данная параметризация имеет факторизованный вид. В свою очередь, это говорит о разделении масштабов и о возможности вычисления турбулентных коэффициентов переноса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-20067).

## **ЭФФЕКТ СИНХРОНИЗАЦИИ В НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО**

Степанов Р.А.<sup>1,2</sup>, Гладких А.В.<sup>2</sup>, Ташкинов Г.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред, Пермь*

<sup>2</sup>*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[rodion@icmm.ru](mailto:rodion@icmm.ru), [andrey.gladckih2017@yandex.ru](mailto:andrey.gladckih2017@yandex.ru), [tashkinov-ga@mail.ru](mailto:tashkinov-ga@mail.ru)

Способность с высокой точностью и на достаточно продолжительном промежутке времени предсказать солнечную активность в настоящее время представляется важной задачей не только с точки зрения фундаментальной науки, позволяя тем самым лучше понять принципы работы солнечного динамо, но и практической, связанной с огромным влиянием, оказываемым Солнцем на Землю.

Работа солнечного динамо основана на взаимодействии дифференциального вращения и спиральной турбулентности, которые создают и поддерживают магнитное поле Солнца. Ключевой элемент процесса — альфа-эффект, связанный со спиральной турбулентностью. Классические модели солнечного динамо полагают его постоянным или слабо изменяющимся, что не позволяет в полной мере описывать наблюдаемые закономерности солнечной активности. С другой стороны, введение осциллирующего альфа-эффекта способствует лучшему описанию синхронизации солнечных циклов [1].

За основу работы была взята нелинейная модель среднего поля солнечного динамо, дополненная динамически нелинейной магнитной спиральностью [2]. Данная модель была модифицирована включением в альфа-эффект дополнительной периодической составляющей. Это позволило колебаниям магнитного поля модели, несмотря на сильную стохастичность, достичь более высоких значений регулярности и синхронизации, чем у моделей без периодического альфа-эффекта.

В работе предложена альтернатива традиционному методу Дике [3], используемому для оценки эффекта синхронизации. Данный метод хорошо работает, если есть однозначное соответствие между циклами динамо процесса и колебаний альфа-эффекта. В случае усиления стохастичности динамо процесса, некоторые циклы могут пропадать, что приводит к неадекватному результату. В работе показано, что подход на основе статистического распределения сдвига фазы между осцилляциями магнитного поля и альфа-эффекта менее чувствителен к сбоям периодичности и может быть использован для выявления эффекта синхронизации при сильной нелинейности процесса.

В результате взаимодействия между периодическим альфа-эффектом и нелинейной магнитной спиральностью возникает близкая к наблюдаемым солнечным циклам динамика магнитного поля. Эта находка открывает новые возможности для улучшения предсказательных способностей моделей солнечной активности.

Исследование было поддержано Российским научным фондом (проект № 21-72-20067).

### **Литература**

- [1] Stefani, F., Giesecke, A., Weber, N., Weier, T., On the synchronizability of Tayler-Spruit and Babcock-Leighton type dynamos // *Solar Physics*. – 2018. – т. 293, № 12. – 19 с.
- [2] Y. Kleorin, N. Safiullin, N. Kleorin, S. Porshnev, I. Rogachevskii, D. Sokoloff, The dynamics of Wolf numbers based on nonlinear dynamos with magnetic helicity: comparisons with observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2016. – т. 460. – с. 3960.
- [3] Dicke, R. Is there a chronometer hidden deep in the Sun? // *Nature*. – 1978. – т. 276. – с. 676-680.

## **ДЕФОРМАЦИЯ МАГНИТОАКТИВНОГО КАНТЕЛИВЕРА, ЛЕЖАЩЕГО НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ**

Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[sov@icmm.ru](mailto:sov@icmm.ru), [raikher@icmm.ru](mailto:raikher@icmm.ru)

В настоящей работе исследуется поведение кантилевера из магнитоактивного эластомера (МАЭ), лежащего на горизонтальной плоскости, в однородном магнитном поле, направленном вертикально. МАЭ, из которого изготовлен кантилевер, предполагается полностью магнитомягким. Показано, что в квазистатическом цикле возрастание/убывание поля изгиб такого кантилевера происходит в вертикальной плоскости и сопровождается значительным гистерезисом. Этой конфигурации – в отличие от случая кантилевера, вертикально висящего в горизонтальном поле, где деформация возникает по сценарию перехода второго рода – присущ качественно иной эффект, обусловленный наличием силы тяжести и непроницаемой подложки. Аналитическая модель указывает на поведение, близко напоминающее переход первого рода. Однако особенность рассматриваемой системы в том, что – в силу своей массивности – она не подвержена спонтанным флуктуациям, и поэтому всегда остаётся устойчивой по отношению к малым возмущениям. Иными словами, область гистерезиса формально имеет бесконечную протяжённость по полю: горизонтальная и изогнутая конфигурации разделены энергетическим барьером, высота которого, хотя и убывает с ростом поля, но всегда остаётся конечной.

Методика исследования основана на вариационном анализе полной энергии системы, включающей упругий, магнитный и гравитационный вклады. Для описания деформаций разработаны аналитические модели, демонстрирующие соответствие между теоретическими расчётами и экспериментально наблюдаемыми режимами деформации. Показано, что индуцированная полем конечно-амплитудная (по величине изгиба) деформация имеет две, в принципе, вполне конкурентных между собой моды: простой изгиб (подъём свободного конца кантилевера) и дуга (hairpin) – режим, при котором происходит подъём средней части при том, что оба конца, закреплённый и свободный, не отрываются от подложки.

Абсолютная устойчивость к малым возмущениям – это предсказание модели, в которой все материальные и геометрические параметры кантилевера, а также характеристики поля предполагаются идеально однородными. Между тем, реальная система, содержащая неизбежные дефекты в структуре материала и/или некоторые нарушения геометрии, должна претерпевать деформационный переход по достижении полем некоторого конечного значения, и этот результат подтверждается экспериментальными наблюдениями. Анализ показывает, что это «критическое» значение может быть запрограммировано путём предварительного внесения контролируемых искажений. Это открывает возможность управления ансамблями МАЭ-кантилеверов, выполняющих роль «ресничек» или адаптивных покрытий.

Полученные результаты могут найти применение в мягкой робототехнике, управлении потоками жидкости и создании магнитоуправляемых манипуляторов. Из горизонтальных кантилеверов можно формировать смарт-покрытия, способные изменять свою шероховатость. Однако для количественной оценки описанных эффектов необходимы, конечно, уточнения модели: включение в неё нелинейностей и расширение спектра допустимых деформационных паттернов.

Работа выполнена в рамках проекта АААА-А20-120020690030-5.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Струкова В.И., Носов Ю.О., Каменских А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[Veloiv\\_psti@mail.ru](mailto:Veloiv_psti@mail.ru), [ura.4132@yandex.ru](mailto:ura.4132@yandex.ru), [anna\\_kamenskih@mail.ru](mailto:anna_kamenskih@mail.ru)

На настоящий момент аддитивные технологии являются флагманом для развития технологических процессов. Широко используемым направлением применения аддитивных технологий является создание прототипов и оснастки из фотополимерных смол. Аддитивно отвержденные фотополимерные смолы нашли свое применение во многих отраслях жизнедеятельности человека от биомедицины до машиностроения [1, 2]. Одним из актуальных направлений исследования является литье по выжигаемым моделям [3, 4]. Но существует большой процент выбраковки керамических заготовок для литья при выжигании фотополимерной основы, что связано с сильным термическим расширением материала. Существуют разные подходы к снижению уровня термического расширения заготовок, например создание ячеистых полых структур, а не монолитных прототипов. При этом требуется математическое описание поведения материалов в рамках термомеханики и создание численных моделей. В данной работе рассмотрена термомеханика фотополимеров с целью прогнозирования поведения объектов исследования.

На первом этапе реализации задачи выполнено описание вязкоупругого поведения фотополимерного материала с помощью рядов Prony: описание зависимости материальных констант от температуры. Численная идентификация выполнена на основе экспериментальных данных для материала SI500 (EnvisionTec Inc., Ferndale, Michigan), приведенных в открытой литературе [4]. Проведена серия численных экспериментов по определению термомеханического поведения фотополимера при разных скоростях нагрева  $\dot{T} = 2; 5; 10; 16$  °/мин для цилиндрических образцов, отличающихся габаритными размерами. Установлено, что найденные параметры, при имитации натурального эксперимента, показывают удовлетворительные результаты. Отклонение численного решения от данных натуральных экспериментов не превышает 10 %.

На втором этапе исследования рассмотрено термическое расширение цилиндрических образцов из фотополимерных материалов в свободном и стесненном состоянии. Моделирование стесненного состояния выполнено в рамках имитации создания керамической формы разной толщины и характера контакта на границе фотополимер-керамика. Проанализировано влияние геометрических параметров модели и скорости нагрева на напряженно-деформированное состояние системы фотополимер-керамика.

В рамках направления развития научной тематики планируется проведение серии натуральных экспериментов для определения термомеханических и теплофизических свойств современных фотополимеров и материала SI500 после естественного старения.

### Литература

- [1] Goracci C., Juloski J., D'Amico C., Balestra D., Volpe A., Juloski J., Vichi A. Clinically Relevant Properties of 3D Printable Materials for Intraoral Use in Orthodontics: A Critical Review of the Literature // Journal Materials. – 2023. – Vol. 16, № 6. – Art. 2166.
- [2] Huang Y.M., Jiang C.P. Numerical analysis of a mask type stereolithography process using a dynamic finite-element method // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – Vol. 21. – P. 649–655.
- [3] Sameni F. Additive manufacturing assisted investment casting: vat photopolymerisation of sacrificial casting patterns for highly precise and complex components: dis. ... doctor of philosophy. – Loughborough, 2023. – 121 p.
- [4] Сметанников О.Ю., Самусев И.В. Экспериментальная идентификация параметров определяющих соотношений для фотополимерного композита // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 105-116.



## АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЖИДКОСТЬЮ В ТОРОИДАЛЬНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ПЕТЛЕ

Ступникова А.В., Брацун Д.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[stypnast2014@yandex.ru](mailto:stypnast2014@yandex.ru), [DABracun@pstu.ru](mailto:DABracun@pstu.ru)

Поведение активной среды обусловлено самодвижением включенных в неё активных микроскопических элементов или ботов, которые способны преобразовывать энергию среды в механическую работу и создавать новые состояния среды. Программирование поведения ботов определяет свойства всей среды. Гибкая стратегия поведения ботов, обладающих чувством кворума и способных динамически менять программу действий, позволяет достигать среде ранее невозможных состояний. В недавних работах [1-3] были продемонстрированы экспериментально и теоретически новые возможности таких сред.

В рамках данной работы мы предполагаем, что боты обладают свойством термотаксиса, т.е. проявляют двигательную реакцию на градиент температуры. Так как плотность самих ботов может задаваться при их производстве, то рой может локально создавать плотность, которая отличается от плотности несущей среды. Таким образом, коллективные действия ботов по перераспределению концентрации роя в среде потенциально могут в реальном времени компенсировать изменения плотности несущей среды, которая неоднородно нагрета.

В данной работе мы теоретически исследовали возможность роя активно управлять физической системой на примере тороидального термосифона, представляющего собой узкий замкнутый канал с круглым сечением, находящийся под действием силы тяжести [4]. Было исследовано два варианта нагрева [5]: во-первых, рассмотрен случай заданного теплопотока через границы термосифона. Во-вторых, рассмотрен более сложный случай заданной температуры на стенках термосифона. Методом Галеркина для каждого случая нагрева получена конечномерная динамическая модель 7-ого порядка, в которой первое уравнение описывает скорость жидкости в канале, два уравнения описывают динамику тепловых мод и четыре уравнения определяют динамику концентрации роя ботов. Показано, что задача сводится к нелинейному взаимодействию двух динамических систем. Нелинейный анализ полученных моделей показывает, что при определенных условиях рой ботов способен подавляет тепловую конвекцию, сводя состояние термосифона к квазиравновесию, в котором скорость жидкости испытывает небольшие флуктуации скорости. Показано, что успех управления критически зависит от скорости реакции роя на внешние изменения и скорости перемещения отдельных ботов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM- 2023-0003).

### Литература

- [1] Leaman E. J., Geuther B. Q., Behkam B. Hybrid centralized/decentralized control of a network of bacteria-based bio-hybrid microrobots // J. Micro-Bio Robot. – 2019. – V. 15(1). – P. 1-12.
- [2] Slavkov I. et al. Morphogenesis in robot swarms // Sci. Robot. – 2018. – Vol. 3, No. 25. – Art. eaau9178.
- [3] Bratsun D., Kostarev K. Phase transition in a dense swarm of self-propelled bots // Fluid Dynamics & Materials Processing. – 2024. – Vol. 20, No. 8. – P. 1785-1798.
- [4] Bratsun D., Krasnyakov I., Zyuzgin A. Delay-induced oscillations in a thermal convection loop under negative feedback control with noise // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. – 2017. – V.47. – P. 109-126.
- [5] Pacheco-Vega A. et al. Nonlinear analysis of tilted toroidal thermosyphon models // Int. J. Heat Mass Transf. – 2002. – T. 45. – №. 7. – С. 1379-1391.

## ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НАМАГНИЧЕННОСТИ МОНОДИСПЕРСНОГО АНСАМБЛЯ НЕПОДВИЖНЫХ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ

Субботин И.М., Иванов А.О.

Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург  
[Igor.subbotin@urfu.ru](mailto:Igor.subbotin@urfu.ru), [Alexey.Ivanov@urfu.ru](mailto:Alexey.Ivanov@urfu.ru)

Феррокомпозиты состоят из ансамбля магнитных микро- и наночастиц, внедренных в немагнитную среду. Отклик магнитного материала, входящего в состав композита, на внешнее магнитное поле определяется двумя основными физическими механизмами: броуновским вращением частиц и неелеевским вращением магнитных моментов внутри частиц [1]. Для ансамблей магнитных частиц, взвешенных в жидких носителях, имеют место оба механизма. В случае же когда наполнитель жестко в заморожен в твердую полимерную матрицу, частицы теряют свои поступательные и вращательные степени свободы. В этом случае неелеевская релаксация становится единственным механизмом, определяющим магнитные свойства ансамблей таких обездвиженных частиц. На основе этого факта в процессе синтеза композита можно добиться анизотропии магнитных свойств, посредством фиксирования приложенным магнитным полем в выбранном направлении лёгких осей частиц в процессе полимеризации. В результате полученный композитный материал будет иметь максимальный магнитный отклик вдоль того направления, в котором было приложено поле при затвердевании [2-3]. В отсутствие поля такие материалы в силу процессов релаксации теряют намагниченность.

Данная работа посвящена моделированию и численному расчёту динамики релаксации намагниченности жесткого феррокомпозита с намагниченного вдоль оси анизотропии структурированных магнитных частиц. Для решения поставленной задачи численно решается уравнение Фоккера-Планка-Брауна [4] для ансамбля невзаимодействующих, а в дальнейшем и для взаимодействующих частиц.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-12-00039.

### Литература

- [1] A. O. Ivanov and P. J. Camp. Phys. Rev. E, vol. 102 (2020), pp. 032610
- [2] Borin D.Yu., Odenbach S. // J. Physics: Condensed Matter. 2009. V. 21. No. 24. Art. No. 246002.
- [3] Stepanov G.V., Borin D.Y., Kramarenko E.Y., et al. // Polymer Science Ser. A. 2014. V. 56, No. 5. P. 603.
- [4] Coffey W.T., Cregg P.J., Kalmykov Y.P. // in Advances in Chemical Physics, ed. I. Prigogine and S.A. Rice. New York, Wiley. 1993. V. 83. P. 263.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ КАПЛИ, ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ В ЗАПОЛНЕННОМ ЖИДКОСТЬЮ КРУГЛОМ КАНАЛЕ**

Субботин С.В., Козлов В.Г.

*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*  
[subbotin\\_sv@pspu.ru](mailto:subbotin_sv@pspu.ru), [kozlov@pspu.ru](mailto:kozlov@pspu.ru)

Экспериментально исследуется динамика капельного включения в заполненном жидкостью цилиндрическом канале круглого сечения. Капля полностью заполняет всю ширину канала и не смешивается с окружающей жидкостью. Линия контакта жидкостей с каналом является осесимметричной, причем капля лучше смачивает стенки. На границах канала задан переменный градиент давления, благодаря чему форма межфазной поверхности меняется по гармоническому закону. На первом этапе внимание уделяется структуре осреднённых течений, возбуждаемых вибрациями. В случае низких безразмерных частот во внешней жидкости формируется тороидальный вихрь, циркуляция жидкости в котором направлена от границы раздела во внешнюю область. При этом внутри капли формируется пара вложенных тороидальных вихрей – пристеночный и приосевой. Скорость осреднённого течения квадратичным образом зависит от амплитуды вибраций и линейным образом от частоты, причем во внешней жидкости скорость оказывается выше. С увеличением безразмерной частоты вихри внутри капли уменьшаются в поперечном размере и прижимаются к стенкам полости. При переходе к высоким безразмерным частотам вблизи оси канала формируется тороидальное течение, направление движения жидкости в котором противоположно тому, что наблюдается в низкочастотном пределе. Полученные результаты хорошо согласуются с исследованиями скорости и структуры вибрационных потоков в модели сфероидальной капли, покрытой адсорбционной плёнкой [1]. На втором этапе исследовано влияние осцилляционного воздействия на массоперенос через границу раздела фазового включения. Для этих экспериментов использована пара жидкостей вода и хлорбензол. Последний насыщен родамином и освещается зелёным лазером. Распределение и концентрация примеси в жидкостях определяется по интенсивности переизлучения родамина. Обнаружено, что осреднённые течения, возбуждаемые вибрациями, существенно интенсифицируют диффузию примеси через границу раздела. Исследуется связь между интенсивностью массопереноса (средней яркостью капли) и параметрами вибраций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 23-11-00242).

### Литература

[1] Козлов В.Г., Сабиров Р.Р., Субботин С.В. Осредненные течения в осциллирующей сфероидальной полости с эластичной стенкой // Изв. РАН. МЖГ. – 2018. – № 2. – с. 16–26.

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ

Сухановский А.Н.<sup>1</sup>, Гаврилов А.А.<sup>2</sup>, Васильев А.Ю.<sup>1</sup>, Попова Е.Н.<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, san@icmm.ru

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Представлены результаты численного моделирования крупномасштабной атмосферной циркуляции в постановке приближенной к лабораторной модели общей циркуляции атмосферы [1-3]. Основной целью данного исследования является описание адаптации землеподобной атмосферной системы к вариациям скорости вращения при фиксированной мощности нагрева и охлаждения. При малых скоростях вращения реализуется осесимметричный режим Хэдли. Увеличение скорости вращения приводит к потере его устойчивости и смещению аналога ячейки Хэдли к периферии. Помимо этого происходит образование еще двух относительно слабых меридиональных ячеек (аналогов полярной ячейки и ячейки Ферреля). Изменения в структуре среднего течения сопровождаются заметной вариацией распределения средней температуры. Адаптация системы к новым условиям приводит к развитию волновых движений, которые компенсируют уменьшение теплового потока за счет средней циркуляции. С увеличением скорости вращения регулярные бароклинные волны начинают играть ключевую роль в переносе тепла. Дальнейшее увеличение скорости вращения приводит к нерегулярному волновому бароклинному режиму (атмосферный режим, Рис.1), который характеризуется ростом энергии волн меньшего масштаба. Общая кинетическая энергия относительного движения потока уменьшается с ростом скорости вращения, однако энергия радиального потока, обеспечивающего большую часть теплопереноса, увеличивается за счет пульсаций скорости. Показано хорошее качественное согласие с результатами полномасштабных расчетов атмосферной циркуляции землеподобных планет [4].

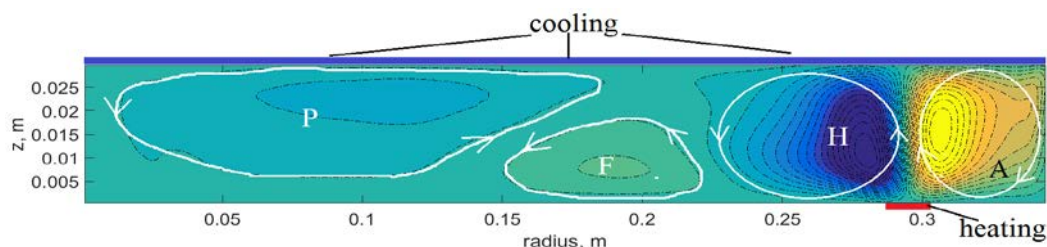


Рис.1. Схема меридиональной циркуляции в атмосферном режиме, состоящей из лабораторных аналогов ячеек Хэдли (H), Ферреля (F), полярной (P) и дополнительной пристеночной ячейки (A).

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-61-00098

### Литература

- [1] Sukhanovskii A., Popova E., Vasiliev A. A shallow layer laboratory model of large-scale atmospheric circulation // Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics. – 2023. – V.117, N.3. –P. 155-176
- [2] Васильев А.Ю., Попова Е.Н., Сухановский А.Н. Структура течений в лабораторной модели общей циркуляции атмосферы // Вычислительная механика сплошных сред. – 2023. – Т.16(3). – с. 321–331.
- [3] Sukhanovskii A., Gavrilov A., Popova E., Vasiliev A. The study of the impact of polar warming on global atmospheric circulation and mid-latitude baroclinic waves using a laboratory analog // Weather and Climate Dynamics, – 2024. – V.5(2). –P. 863-880
- [4] Kaspi Y., Showman A. P. Atmospheric dynamics of terrestrial exoplanets over a wide range of orbital and atmospheric parameters //The Astrophysical Journal. – 2015. – Т. 804. – №. 1. – С. 60.

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АУКСЕТИКОВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Тарасова А.С.<sup>1</sup>, Ташкинов М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[a.tarasova@pstu.ru](mailto:a.tarasova@pstu.ru), [m.tashkinov@pstu.ru](mailto:m.tashkinov@pstu.ru)

Механические метаматериалы – это особый класс структур, чьи уникальные свойства, обусловлены не химическим составом, а тщательно спроектированной микроархитектурой. Особое внимание привлекают метаматериалы с отрицательным коэффициентом Пуассона, называемые ауксетиками. В отличие от обычных материалов, которые при растяжении сужаются, ауксетика демонстрируют противоположное поведение. Они находят широкое применение в авиастроении, автомобильной промышленности, спортивных приложениях и биомедицине. Целью данной работы является изучение механического отклика ауксетичного цилиндра при одновременном приложении нагрузки и воздействии температуры, а также оценка деформации в плоскости ауксетичности в зависимости от коэффициента термического расширения материала решетки.

Геометрия ауксетичного цилиндра и решетки основана на повторно-входящей элементарной ячейке (Рис.1) [1]. В отличие от традиционных ауксетичных цилиндров, плоскость ауксетичности разработанных в данной работе моделей расположена перпендикулярно оси цилиндра, что определяет специфику их поведения. Для понимания поведения ауксетичных решеток под комбинированными термическими и механическими нагрузками были проведены вычислительные эксперименты. Исследовались деформации как прямоугольных, так и цилиндрических решетчатых структур [2].

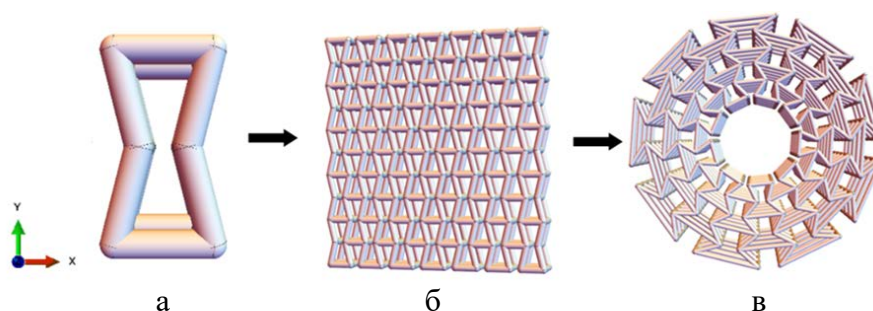


Рис. 1. а – элементарная ячейка, б – ауксетичная решетка, в – ауксетичный цилиндр

Проанализирован механический отклик ауксетичных структур при различных видах нагружения с вариацией коэффициентов термического расширения и типа граничных условий. Получены и сравнены зависимости поперечной деформации от КТР. Оценено влияние КТР на структурный коэффициент Пуассона прямоугольных ауксетичных решеток, характеризующий ауксетичное поведение структуры при термомеханическом нагружении.

Исследование выполнено в рамках программы "Приоритет-2030" и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2024-0013).

### Литература

- [1] Tashkinov M. et al. Composites with Re-Entrant Lattice: Effect of Filler on Auxetic Behaviour // Polymers (Basel). 2023. Vol. 15, № 20.
- [2] Тарасова А.С., Ташкинов М.А. Влияние изменения коэффициента термического расширения на термомеханическую деформацию цилиндров с ауксетичностью в плоскости на основе повторно-входящих ячеек – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.6.06 // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2024. – № 6. – С. 60–71.

## ЦЕРЕБРАЛЬНАЯ АНГИОАРХИТЕКТОНИКА В НОРМЕ И ПРИ ПАТОЛОГИЯХ – ЭФФЕКТ ДИСЛОКАЦИИ АРТЕРИЙ

Тихвинский Д.В.<sup>1</sup>, Куянова Ю.О.<sup>1</sup>, Бервицкий А.В.<sup>1</sup>, Станкевич Ю.А.<sup>1</sup>, Чутков Д.С.<sup>1</sup> и Паршин Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева, Новосибирск  
[nabster98@yandex.ru](mailto:nabster98@yandex.ru)

Заболевания сосудов головного мозга могут приводить к инвалидизации пациентов, их смерти и занимают лидирующие позиции в рейтинге ВОЗ учета наиболее опасных болезней [1]. Численное моделирование гемодинамики сосудов Вилизиева круга является на сегодняшний день одним из основных методов предоперационного моделирования [2]. Принципиально важным фактом, обнаруженным нами ранее, является то, что трехмерная структура этих сосудов подвержена изменению и порой существенному [3] на протяжении относительно небольшого интервала времени (месяцы-год). Для малых церебральных аневризм критериев риска разрыва не существует, несмотря на то что они составляют абсолютное большинство среди всех разрывающихся аневризм. Целью настоящей работы является определение морфологических и гемодинамических предикторов роста и/или образования малых церебральных аневризм, а также оценка влияния факторов стресса и адаптации к нему на ангиоархитектонику церебральных сосудов и перфузию церебрального кровотока в бассейне передней мозговой артерии у здоровых добровольцев.

Для целей проведения исследования нами были проанализированы 2 выборки: пациентов ФНЦ (Новосибирск) с малыми церебральными аневризмами и молодых здоровых добровольцев без патологий развития церебральных сосудов. Обе группы подвергались динамическому гемодинамическому мониторингу. Вторая группа также подвергалась психологическому тестированию, а также МР-ангиографии в совокупности с исследованием МР-перфузии в бассейне передних мозговых артерий в различных по времени точках: в первой группе не испытывала воздействия заданного стрессового фактора, а во второй напротив испытывала воздействие стрессового фактора. Анкетирование добровольцев проводилось по методике оценки общего уровня стресса и его источников, уровня тревоги, депрессии и типа саморегуляции по контролю за действиями [4]. В результате было обнаружено изменение кровотока в бассейне передних мозговых артерий, а также качественное совпадение изменения кровотока по результатам измерения МР-перфузии и численного моделирования течения крови. Статистически значимых изменений результатов психологических тестов до и после воздействия стрессового фактора по U-критерию Манна-Уитни выявлено не было. Однако, при интерпретации результатов после воздействия стрессового фактора происходит смещение результатов по опроснику "Уровень психоэмоционального напряжения".

### Литература

- [1] The top 10 causes of death. World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- [2] D. Tikhvinsky et al. Numerical Assessment of the Risk of Abnormal Endothelialization for Divertter Devices: Clinical Data Driven Numerical Study, J. Pers. Med. 2022, 12, 652
- [3] Тихвинский Д. В. и др. Динамическое наблюдение изменения морфологических и гемодинамических характеристик малых церебральных аневризм //Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. – 2023. – Т. 12. – №. 1. – С. 172-180
- [4] Шапкин С.А. Экспериментальное изучение волевых процессов. М. 1997.140 с

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦА НА ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА JOHNSON–COOK

Третьяков Я.А., Безверхий Д.С., Кондратьев Н.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[yartret1908@gmail.com](mailto:yartret1908@gmail.com), [bezverkhyds@yandex.ru](mailto:bezverkhyds@yandex.ru), [kondratevns@gmail.com](mailto:kondratevns@gmail.com)

Определение механических свойств материалов в натурном эксперименте и их последующее воспроизведение в математических моделях являются актуальными задачами современной инженерии и науки о материалах [1]. Экспериментальное определение свойств материалов, проводимое на образцах заданной геометрии при различных условиях нагружения, является основой для идентификации и верификации математических моделей материалов. Для определения материальных характеристик используется рабочая область образца. В ходе проведения анализа натурных испытаний необходимо учитывать появление концентрации напряжений и деформаций, в частности при образовании шейки образца [2]. Локализация напряжений и деформаций в рабочей зоне значительно влияет на отклик материала. Определение размеров рабочей зоны образца и методика учета напряжений и деформаций при образовании шейки остаются открытыми вопросами в экспериментальной и теоретической механике [2].

Для решения сформулированной проблемы была создана конечно-элементная (КЭ) модель образца. Для описания неупругого поведения материала применялась широко распространенная модель Johnson–Cook [3], параметры которой были определены методом оптимизации Роя частиц для стали AISI 1045 [4]. Моделирование одноосного растяжения образца проводилось в КЭ-пакете Abaqus. В ходе исследования проводилось определение рабочей области образца и ее изменение в процессе образования шейки. Получаемые поля напряжений показаны на рисунке 1.

S, Mises

(Avg: 75%)

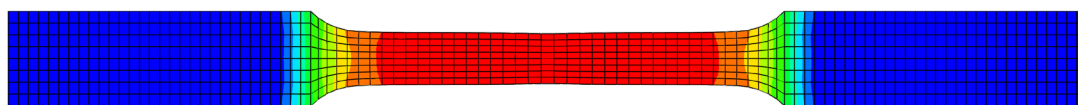
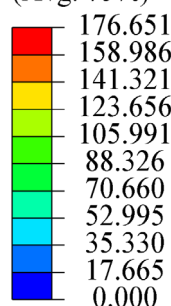


Рисунок 1 – Распределение полей напряжений (МПа) в образце при одноосном растяжении

### Литература

- [1] Bhaduri A. Mechanical properties and working of metals and alloys. – Singapore: Springer Singapore, 2018. – Vol. 264.
- [2] Cadoni E. et al. Influence of the gauge length on dynamic direct tensile test //Procedia Structural Integrity. – 2023. – Vol. 47. – P. 630-635.
- [3] Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. //Proc. 7th Int. Symp. Ballist. – 1983. Vol. 21. – P. 541–547.
- [4] Murugesan M., Jung D.W. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications //Materials. – 2019. – Vol. 12 (4). – P. 609.

## БРИЗЕР КОМПЛЕКСНОГО ДВУМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ КЛЕЙНА-ГОРДОНА

Трунин А.С.<sup>1</sup>, Юров А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград  
[deletednyas@live.ru](mailto:deletednyas@live.ru), [aiurov@kantiana.ru](mailto:aiurov@kantiana.ru)

Нелинейное уравнение Клейна-Гордона (НУКГ) встречается в самых различных областях теоретической и математической физики. Скажем, в одномерном случае, для комплексного поля это уравнение появляется при описании взрывных неустойчивостей на поверхности жидкого диэлектрика [1] или жидкометаллической поверхности, помещенной в электрическое поле [2], при учете неустойчивости Тонкса-Френкеля [3], [4]. Волновой коллапс описываемый НУКГ, исследовался во множестве работ (например, [5], [6], [7]). В основном эти исследования связаны с одномерными уравнениями, однако существуют интересные результаты с многомерными обобщениями, например в недавней работе [8] формализм обратной задачи рассеяния развивается для двумерного вещественного НУКГ.

Вещественное нелинейное уравнение Клейна-Гордона включает слагаемое, пропорциональное третьей степени зависимой переменной и, вообще говоря, не интегрируемо аналитическими методами, за исключением специальных случаев. В работе [9] предложена методика построения приближенного бризерного решения одномерного НУКГ. Бризеры представляют собой весьма интересные нелинейные структуры, которые, как точные решения были обнаружены у одномерного уравнения синус-Гордон (см. например [10]). Разумеется, в отличие от НУКГ, уравнение синус-Гордон относится к классу точно интегрируемых: оно допускает пару Лакса, преобразования Бэклунда и обладает свойством Пенлеве. Неинтегрируемое НУКГ, однако, обладает решениями, демонстрирующими намного более сложное поведение (при численном анализе). Например, при столкновении решений кинк-антикинк не происходит ожидаемой аннигиляции, а образуется нетривиальное, долгоживущее, локализованное, слабозатухающее образование, являющееся неинтегрируемым аналогом бризера уравнения синус-Гордон [11]. Еще более необычными являются решения НУКГ типа «тритон», а также поразительно богатый феномен «окон разлета» [12], включая фрактальную структуру так называемых мульти-боунс «окон» [11], [13]. Подчеркнем, что все эти эффекты получены путем численного эксперимента.

В данной работе мы рассматриваем комплексное двумерное НУКГ и находим точные, а не приближенные решения типа бризера. Мы показываем два типа таких решений. Первое является обобщением точных решений, найденных одним из авторов в [14], оно содержит осциллирующую фазу, а модуль решения оказывается локализованной на плоскости рациональной структурой, которую можно назвать «лампом на пьедестале». Второе решение, по-видимому, ранее не описывалось в литературе — структура, локализованная по всем кроме одного направления на плоскости, но упомянутое выделенное направление не определяет линии уровня, поскольку вдоль этого направления решение осциллирует со временем.

### Литература

- [1] Горьков Л.П., Черникова Д.М., О режиме развития неустойчивости заряженной поверхности гелия // ДАН СССР, 1976, т. 228, вып. 4. - с. 829–832.  
[2] Зубарев Н.М., Взрывной рост возмущений поверхности проводящей жидкости в электрическом поле // Письма в журнал технической физики, 1999, т. 25, вып. 21. - с. 65-69.  
[3] Tonks L., A Theory of Liquid Surface Rupture by a Uniform Electric Field // Phys. Rev. 1935. V. 48. P. 562.



- [4] Френкель Я.И. // ЖТФ, 1936, т. 6. – 347 с.
- [5] Кузнецов Е.А., Лушников П.М. // ЖЭТФ, 1995, т. 108, вып. 2 (8). -с. 614–630.
- [6] Maslov E.M., Shagalov A.G., On the dynamics of scalar wave collapse // Phys. Lett. A. 1998. V. 239. P. 46–50.
- [7] Зубарев Н.М., Анализ условий коллапса для нелинейного уравнения Клейна–Гордона с периодическими граничными условиями // Письма в журнал технической физики, 2001, т. 27, вып. 15, - с. 33-37.
- [8] Sasaki H., On inverse scattering for the two-dimensional nonlinear Klein-Gordon equation // arXiv:2406.06362 [math.AP].
- [9] Завьялов Д.В., Конченков В.И., Крючков С.В., Бризер малой амплитуды нелинейного уравнения Клейна-Гордона // Письма в ЖТФ, 2022, вып. 12. - с. 1763–1769.
- [10] Ablowitz M.J., Kaup D.J., Newell A.C., Segur H., The Inverse Scattering Transform-Fourier Analysis for Nonlinear Problems // Stud. Appl. Math., 1974, 53 (4), P. 249.
- [11] Белова Т.И., Кудрявцев А.Е., Солитоны и их взаимодействия в классической теории поля // УФН, 1997, 167:4, - с. 377–406.
- [12] Aubry S. // J. Chem. Phys, 1976, 64, P. 3392.
- [13] Anninos P., Oliveira S., Matzner R., Fractal structure in the scalar  $\lambda(\varphi^2-1)$  theory // A Phys. Rev., 1991, D 44, 1147
- [14] Yurova A.A., Yurov A.V., Generalized Fubini instantons // Phys.Lett.A 372, 2008, 4222-4229.

## **МЕХАНИКА СТЕНОК АРТЕРИЙ В НОРМЕ И ПРИ ПАТОЛОГИЯХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРОЧНОСТНЫХ ТЕСТОВ И КЛИНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Тупицына А.Д.<sup>1,2</sup>, Паршин Д.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

*a.tupitsyna@g.nsu.ru, d.parshin@g.nsu.ru*

Аневризма брюшной аорты – это распространенное заболевание сердечно-сосудистой системы, характеризующееся патологическим расширением участка сосуда. Одной из важнейших задач современной медицины является оценка риска ее разрыва, поскольку общее число неблагоприятных результатов при разрыве составляет 80,9% [1], а разрыв аорты вне медицинского учреждения фатален. По этой причине важно исследовать механические свойства стенки аневризмы аорты и их динамику для дальнейшего прогнозирования состояния сосуда. Существует множество методов для изучения этого феномена. На разрывной машине при помощи одноосного теста ткани стенки аневризмы аорты устанавливается зависимость приложенной к образцу силы от циклического увеличения перемещения. Такой эксперимент имитирует регулярную нагрузку на сосуд, которая сопровождает человека в течение жизни. Образцы для исследования доставляются в лабораторию вскоре после необходимого хирургического лечения пациентов при их согласии на участие в исследовании. Стенка аорты сочетает в себя свойства упругого и вязкого материала. По этой причине вязкоупругая модель материала стенки наиболее точно отображает реакцию на различные виды нагрузок. При этом использование дробных производных описывает эффект памяти ткани [2], накапливающей микроповреждения. В результате была рассмотрена вязкоупругая модель с учетом данных, полученных в ходе прочностных тестов и клинических наблюдений. По результатам прочностных тестов строилась зависимость между пиковым значением перемещения и соответствующей величиной диссипации энергии равной площади, образованной между кривыми нагружения и разгрузки. Проведено сравнение приближения экспериментальных данных моделью с дробными производными и вязкоупругой моделью.

### Литература

- [1] Червяков Ю.В., Борисов А.В., Староверов И.Н., Смуров С.Ю. Хирургическая тактика при разрывах аневризмы брюшной аорты. Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2013;6(3):55-58.  
[2] Wen Chen, HongGuang Sun, Xicheng Li, Fractional Derivative Modeling in Mechanics and Engineering – 2022. – с. 179-201

## МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА 42ХНМ НА СВЕРХМНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Уваров С.В., Банников М.В., Оборин В.А.

*«Институт механики сплошных сред УрО РАН» филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь  
usv@icmm.ru*

Сплав 42ХНМ применяется в атомной энергетике в трубопроводах высокого давления [1]. Рабочая температура может достигать 300°C при наличии вибрационных и термоциклических нагрузок. Для оценки возможности гарантированной эксплуатации на протяжении 60 лет была поставлена задача испытать образцы из указанного сплава в условиях сверхмногоциклового (до  $10^{10}$  циклов) усталости при указанной температуре.

Особенность проведения испытаний заключается в том, что образец сам может нагреваться до достаточно высоких температур. При этом процесс тепловыделения не постоянен во времени. Вследствие этого для поддержания постоянной температуры испытаний необходимо контролировать температуру рабочей зоны образца и изменять интенсивность нагрева так, чтобы она оставалась в пределах допуска. Также сплав 42ХНМ является немагнитным, следовательно потери на перемагничивание в нём достаточно малы, что потребовало создания установки индукционного нагрева с повышенной (240 кГц) частотой.

Контроль температуры выполнялся с помощью поверенного инфракрасного пирометра ОРТСТ4MLCFB3: Инфракрасный термометр, стационарный с рабочим диапазоном 0-500°C в центральной точке образца. Также температура контролировалась инфракрасной камерой Flir Cedir Silver для определения градиента температуры по всей поверхности образца. Поскольку для корректной работы нагружающей машины требовался отвод тепла, верхний край образца, закреплённый резьбовым соединением к испытательной машине имел температуру 140-150°C. Свободный торец образца из-за отсутствия отвода тепла в процессе испытаний нагревался до температуры 320-330°C. Центральная часть образца, в которой наблюдались максимальные значения приложенных напряжений, поддерживалась в температурном диапазоне 300-315°C.

Созданная экспериментальная установка позволила выполнить работы по испытанию указанного сплава а также может быть использована для испытаний иных жаропрочных сплавов, например применяемых в авиастроении.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024)

### Литература

[1] Гурович А.С., Фролов Д.А., Мальцев Е.А., Кулешова С.В., Федотова И.В., Федотов Б.А. Фазовые превращения в облученном сплаве 42ХНМ после отжига при повышенных температурах, а также после быстрого отжига, имитирующего условия максимальной проектной аварии. – URL: [http://www.niiar.ru/sites/default/files/safety20/10\\_2019-\\_42hnm-gurovich\\_niiar.pdf](http://www.niiar.ru/sites/default/files/safety20/10_2019-_42hnm-gurovich_niiar.pdf) (дата обращения 3.11.2022)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ ВАЛА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ЕГО РАБОЧЕМУ ПРОГИБУ

Усманов А.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург  
[ysman2d@gmail.com](mailto:ysman2d@gmail.com)

### Введение

В настоящее время при проектировании и производстве деталей газотурбинных двигателей (ГТД) максимально допустимые отклонения от номинальных размеров (допуска) задаются с использованием ОСТов и ГОСТов [1], т.е. по табличным значениям, которые, однако, могут быть скорректированы в процессе доводки двигателя по результатам испытаний [2]. Проведение математического моделирования могло бы упростить задачу такой корректировки, исключив необходимость простого перебора. Цель настоящей работы – на примере конкретного ГТД определить оптимальные значения допусков изготовления вала свободной турбины по результатам математического моделирования его рабочего прогиба. Пример рабочего прогиба ротора показан на рис.1.

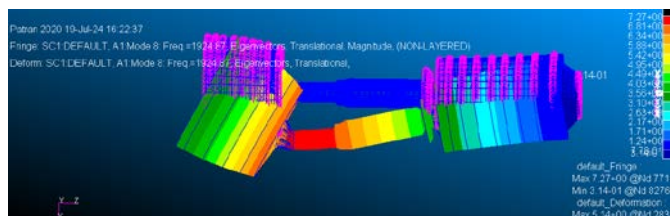


Рис.1. Рабочий прогиб ротора

### Методы исследования

Рассматривается конечно-элементная аппроксимация уравнений теории упругости во вращающейся системе координат в динамической линейной постановке [3]:

$$[M]\{\ddot{\bar{g}}\} + ([B_s] + [B_r] + 2\Omega[C])\{\dot{\bar{g}}\} + ([K] - \Omega^2[Z] + \Omega^2[K_G] + \Omega[K_C]_s)\{\bar{g}\} = \{F_R\} \quad (1)$$

где в качестве исходных нагрузок обычно задаются дисбалансы, приведенные к плоскостям балансировки. Неточности изготовления вала приводят к эксцентриситету сечения и, как следствие, к дополнительной центробежной нагрузке. В данной работе эта нагрузка учтена в  $\{F_R\}$ .

### Результаты

На примере выбранного ГТД был определен динамический рабочий прогиб вала свободной турбины для различных значений допусков. Расчет был повторен в балочной аппроксимации и было получено удовлетворительное согласование с трехмерным случаем. Были определены наиболее оптимальные значения допусков вала с точки зрения отсутствия касания деталей ГТД.

### Литература

- [1] ГОСТ 24643-81.
- [2] Петухов А. Н. Требования к свойствам поверхностного слоя деталей ГТД и ЭУ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 10. – с. 61-76.
- [3] MSC Nastran 2018 Rotordynamics User's Guide. <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/msc-nastran-2018-rotordynamics-user-s-guide-doc11550>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАЗНОТОЛЩИННОГО ВАЛА

Усманов А.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург  
[ysman2d@gmail.com](mailto:ysman2d@gmail.com)

### Введение

Наличие неточностей изготовления валов газотурбинного двигателя может значительно повлиять на динамические процессы, происходящие в них. Например, в [1] показано, что несоосности в соединении валов приводят к большим отклонениям в значениях критических скоростей зубчатых передач. В [2] показано, что наличие эксцентриситета вала ведет к ощутимому увеличению его рабочего прогиба. Целью данной работы было рассмотреть крутильные колебания вала и показать, как на них влияет наличие разнотолщинности.

### Методы исследования

Собственные частоты и формы крутильных колебаний вала определялись путем решения уравнений [3]:

$$[K]\{\varphi\} = \lambda[M]\{\varphi\} \quad (1)$$

В данной работе была определена собственная крутильная форма и соответствующая ей частота колебаний выбранного вала с использованием (1). Результаты были получены для вала без погрешностей и для разнотолщинного вала.

### Результаты

Распределение эквивалентных напряжений в сечении идеального и разнотолщинного валов показаны на рис. 1.

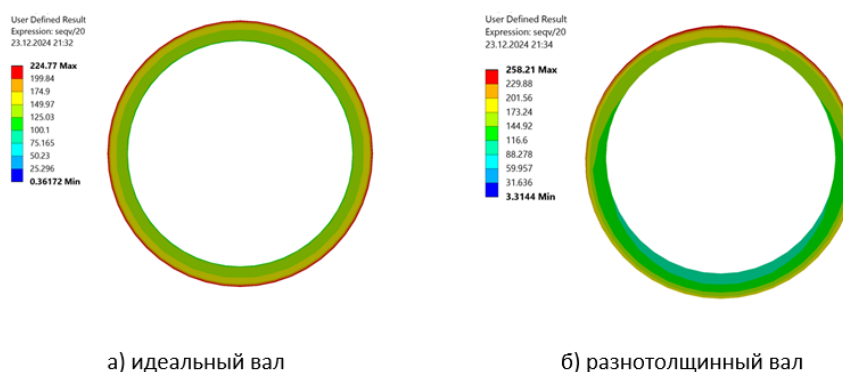


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений идеального и разнотолщинного валов

Результаты показывают, что наличие разнотолщинности вносит существенный вклад в крутильные колебания вала с точки зрения распределения напряжений.

### Литература

- [1] Mayeux F., Rigaud E., Perret-Liaudet J., Dispersion of critical rotational speeds of gearbox: effect of bearings stiffnesses // arXiv preprint physics/0701048. – 2007.  
[2] Усманов А. Р., Модестов В. С., Метод задания центробежных нагрузок валов при расчете дисбалансного поведения роторов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2023. – т. 16, № 1. – с. 132-139.  
[3] ANSYS 2024 R1 Documentation. <https://ansyshelp.ansys.com>

## УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПО ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Устинов К.Б.<sup>1</sup>, Гандилян Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*  
*ustinov@ipmnet.ru*

В приближении цилиндрического изгиба получено решение задачи об упруго-пластическом (без упрочнения) деформировании изгибаемой по цилиндрической поверхности тонкой пластины, с учетом возникающих продольных усилий, при граничных условиях типа обобщенной упругой заделки (как частный случай – жесткой заделки). При описании пластины использовались стандартные кинематические гипотезы Кирхгофа – Лява, что позволило свести задачу к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Получено численное решение данной системы, позволяющее сделать следующие выводы:

Пластическое деформирование начинает развиваться в областях, прилегающих к точкам заделки, сначала со стороны, где имеет место растяжение, а затем и со стороны сжатия. Рост зон пластической деформации происходит монотонно, не вызывая областей разгрузки (в отличие от случая сжимаемого стержня).

До достижения начала пластического деформирования с ростом прикладываемой нагрузки наблюдается рост растягивающих напряжений в верхней точке центрального сечения пластины. Однако, с появлением зон пластических деформаций вблизи точек заделки данный рост замедляется, и растягивающие напряжения не достигают предела пластичности. Таким образом, развитие пластичности в областях, прилегающих к местам заделки, препятствует зарождению пластической зоны вблизи центра пластины, второй потенциально опасной области.

С ростом прикладываемой нагрузки, развитие пластической области вызывает заметный рост второй производной от прогиба по сравнению со значениями, соответствующими случаям, если бы пластина продолжала деформироваться упруго, однако не сильно сказывается на величинах самого прогиба и продольного усилия.

Учет податливости заделки приводит к более высоким значениям нагрузки, соответствующей переходу в пластичность и более высоким значениям нагрузки и соответствующим им прогибам при развитых зонах пластичности. Таким образом, пренебрежение податливостью заделки приводит к недооценки несущей способности пластины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-19-00866 (для КБУ)

## КАЛИБРОВКА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ «БЕТОННАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ ПЛОТИНА – ОСНОВАНИЕ» НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Устинова К.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург  
[ustinovaks@vniig.ru](mailto:ustinovaks@vniig.ru)

Надежная эксплуатация гидротехнических сооружений (ГТС) критически важна для обеспечения энергетической безопасности, управления водными ресурсами, защиты от наводнений и стабильности экосистем. Потенциальные неисправности таких сооружений могут приводить к катастрофическим экономическим, экологическим и прочим последствиям. В условиях меняющегося климата, характеризующегося увеличением экстремальных погодных явлений, необходимость точного мониторинга и прогнозирования состояния ГТС приобретает особое значение.

Горизонтальные перемещения гравитационных бетонных плотин являются одним из ключевых индикаторов их состояния. Систематический анализ изменений этих показателей, особенно в контексте температурных колебаний в бетоне и динамики уровня воды в водохранилище, позволяет своевременно выявлять потенциальные проблемы. Неожиданные отклонения от нормального поведения могут свидетельствовать о развитии дефектов, или других аномалий, требующих немедленной проверки и принятия мер по обеспечению безопасности.

Для раннего обнаружения опасных изменений и предотвращения аварийных ситуаций разрабатываются модели прогнозирования, которые, используя данные мониторинга и результаты моделирования, позволяют оценить ожидаемое поведение плотины в различных условиях. Существенное расхождение между прогнозируемыми и фактическими перемещениями, превышающее установленные критерии безопасности, требует углубленного обследования и принятия решений по стабилизации ситуации.

В работе представлены современные подходы к разработке алгоритмов для построения детерминированной прогностической модели, основанной на расчетах, выполненных с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [1], а также методика создания статистических моделей прогнозирования [2]. Результаты, полученные посредством моделирования, сопоставляются с данными, полученными в ходе натурных замеров горизонтальных перемещений.

Такой комплексный подход, сочетающий передовые методы моделирования и анализа данных, направлен на повышение эффективности мониторинга и прогнозирования деформаций бетонных плотин, обеспечивая их долгосрочную и безопасную эксплуатацию в условиях изменяющейся среды.

### Литература

[1] Зенкевич О., Метод конечных элементов в технике — М.: изд-во «Мир», 1975, 439 с.

[2] Харин, Ю. С. Математические и компьютерные основы статистического моделирования и анализа данных / Ю. С. Харин, В. И. Малюгин, М. С. Абрамович - Минск: БГУ, 2013.

## БИФУРКАЦИИ ТЕЧЕНИЙ ХЕЛЕ-ШОУ В УСЛОВИЯХ РАВНОМЕРНОГО ВРАЩЕНИЯ

Уточкин В.Ю., Брацун Д.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[vyutochkin@pstu.ru](mailto:vyutochkin@pstu.ru), [dabracun@pstu.ru](mailto:dabracun@pstu.ru)

В последние годы появляется все больше передовых технологий, требующих изучения процессов тепло- и массопереноса во вращающейся ячейке Хеле-Шоу. В частности, данная конфигурация может эффективно использоваться при проектировании микрожидкостных устройств [1], поскольку вращение позволяет управлять движением жидкости с помощью пространственно-распределенных сил инерции. В пределе бесконечно тонкого слоя число Россби, представляющее собой отношение силы Кориолиса к инерционному слагаемому уравнений движения, стремится к бесконечности. Это означает, что в рамках стандартной математической модели слагаемое Кориолиса в уравнениях Хеле-Шоу пренебрежимо мало. Однако экспериментальные наблюдения за течением жидкости в подобных условиях указывают на то, что эффект Кориолиса проявляет себя в полной мере [2].

В работе представлен вывод системы уравнений конвекции в приближениях Буссинеска и Хеле-Шоу с учетом слагаемого плавучести Кориолиса. Последовательное изучение системы включает нахождение основного состояния, линейный анализ его устойчивости, слабонелинейный анализ и прямое численное моделирование. Ветвление решений вблизи бифуркации равновесия исследуется методом многих масштабов. Нелинейная динамика конвективных движений вдали от точки первой бифуркации моделируется численно. Полученная таким образом форма нейтральной кривой на плоскости число Рэлея – число Экмана свидетельствует о стабилизирующем влиянии силы Кориолиса. Потеря устойчивости равновесия сопровождается бифуркацией Хопфа, в ходе которой в фазовом пространстве системы возникает 1-Т предельный цикл. Это подтверждает вывод слабонелинейного анализа о возникновении колебательной конвекции при произвольно малом значении числа Экмана. При увеличении числа Рэлея происходит вторая бифуркация Хопфа и от предельного цикла ответвляется двухчастотный тор. Моделирование сильно нелинейных режимов позволяет заметить, что плавучесть Кориолиса приводит к усложнению сценария перехода к хаотической конвекции. Переход сопровождается серией бифуркаций предельных циклов и торов, их разрушением и появлением странных аттракторов тороидального типа.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0003).

### Литература

- [1] D. Bratsun, A. Mizev, V. Utochkin, S. Nekrasov, A. Shmyrova. Nonlinear development of convective patterns driven by a neutralization reaction in immiscible two-layer systems. // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. — 2023. — no. 381. — Art. 20220178.
- [2] V. Y. Utochkin, D. A. Bratsun. Convection induced by centrifugal and Coriolis buoyancy in a rotating Hele-Shaw reactor // *Physics of Fluids*. — 2024. — vol. 36. — Art. 094124.



## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОТВЕРЖДЕНИЯ КАРКАСА НАДУВНОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОРБИТЕ ЗА СЧЕТ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Фагалов А.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Россия, г. Пермь  
[fagalovar@psu.ru](mailto:fagalovar@psu.ru)

Рассматривается каркас рефлектора радиолокационной системы, упрощенно приближаемый набором длинных полых цилиндрических элементов. Конструкция находится в условиях солнечно-синхронной орбиты, нагрев происходит за счет поглощения солнечного и в меньшей степени земного излучения, накопленное тепло распределяется с учетом лучевого теплообмена во внутренней полости и исходит на внешней границе в окружающее космическое пространство в виде теплового излучения. Излучение Земли взято из предположений о том, что Земля является сферическим телом и излучает равномерное рассеянное излучение по всех поверхности.

Для оценки возможности отверждения составляющего препрега был поставлен ряд задач по определению равновесных температур конструкции в зависимости от углов падения солнечного излучения и величины светопоглощающей полосы. Изначально рассматривались 2 варианта внешнего покрытия – тонкая алюминиевая либо медная фольга. Элемент конструкции, покрытый алюминиевой фольгой, поглощает недостаточное количество излучения и слабо нагревается, в случае же покрытия медной фольгой нагрев, наоборот, слишком сильный. Таким образом в месте наиболее интенсивного падения солнечного излучения имеется медная полоса, названная светопоглощающей, обеспечивающая дополнительный прогрев конструкции для достижения температур, требуемых для полноценного протекания реакции полимеризации.

Полученные минимальные и максимальные температуры в элементах представлены в виде графика. Показана возможность достижения требуемых температур во всех элементах при различных размерах поглощающих полос. Найдена температура в стационарном состоянии после поворота в рабочее положение. Таким образом подтверждена возможность отверждения на орбите за счет поглощения теплового излучения Солнца.

### Литература

- [1] Cunningham F. G. Power input to a small flat plate from a diffusely radiating sphere, with application to Earth satellites // Publications of Goddard Space Flight Center 1959-1962, P. 146-156
- [2] Watts R.G. Radiant heat transfer to earth satellites // J. Heat Transf. 87 (3) (1965) 369–373, doi:10.1115/1.3689118.
- [3] K. Sasaki, M. Sznajder Analytical view factor solutions of a spherical cap from an infinitesimal surface // International Journal of Heat and Mass Transfer 2020 Volume 163, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120477>.
- [4] J. Meseguer, I. Pérez-Grande, A. Sanz-Andrés, Spacecraft Thermal Control, 2 - Space environment // Woodhead Publishing 2012, Pages 26-29, ISBN 9781845699963, <https://doi.org/10.1533/9780857096081.15>.
- [5] Демин Д.С., Кононенко П.И., Лебеденко В.И. Концепция бортового радиолокатора на основе АФАР с использованием рефлектора с отверждаемым пневмокаркасом // Труды МАИ. 2021. № 119. DOI:10.34759/trd-2021-119-12
- [6] Ю. В. Баева, Е. В. Лаповок, С. И. Ханков Аналитическая методика расчета тепловых потоков в околоземном пространстве, формирующей тепловой режим космических телескопов // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 30-37. EDN TQNXNZ.
- [7] Теплообмен излучением: Пер. с англ. / Зигель Р., Хауэлл Дж. М.: Мир, 1975. С. 934.
- [8] А. Ю. Беляев, А. Л. Свистков Моделирование отверждаемых цилиндрических элементов надувной антенны наноспутника // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 4(38). С. 5-10. DOI 10.17072/1994-3598-2017-4-5-10. EDN ZXNXMN.

## ВЛИЯНИЕ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Фатталова Д.Р.<sup>1,2</sup>, Гордеев Г.А.<sup>2</sup>, Ломаев С.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск

<sup>2</sup>Удмуртский государственный университет, Ижевск

[w\\_s\\_b\\_and\\_a@bk.ru](mailto:w_s_b_and_a@bk.ru), [gordeevgeorgii@gmail.com](mailto:gordeevgeorgii@gmail.com), [i@slomaev.ru](mailto:i@slomaev.ru)

Формирование зеренной структуры металла при кристаллизации играет ключевую роль в отрасли аддитивной промышленности. Для аддитивного выращивания изделий характерны малая зона расплава, высокая скорость кристаллизации и большой градиент температур между границей раздела твердое тело-жидкость и жидкостью. Вследствие этого формируется крупнозернистая структура металла при остывании, что влечет понижение механических и эксплуатационных свойств и их анизотропию. Чтобы улучшить качество напечатанного изделия применяются различные методы воздействия на зону расплава и ее кристаллизацию [1–6]. Один из методов воздействия на процесс формирования зеренной структуры – ультразвук [1, 3], однако качестве источника ультразвука применение сонотрода накладывает свои ограничения. Один из методов введения ультразвуковой волны в зону расплава – использования двух лазеров [4–6]. Большинство исследователей полагают, что влияние ультразвука на получаемую зеренную структуру обуславливается кавитационными процессами [1, 3]. В зоне расплава всегда присутствуют парогазовые пузырьки, под действием ультразвуковой волны начинают активизироваться процессы кавитации и схлопнувшиеся пузырьки, при схлопывании, образуют ударную волну, которая разбивает растущий металлический кристалл на более мелкие части, тем самым формируя структуру металла с малым равноосным зерном.

При воздействии импульса вещество, покидающее зону расплава, генерирует ультразвуковую волну, тем самым активируя процессы кавитации посредством оптоакустического эффекта. В ходе исследований были найдены пороговые резонансные значения ультразвука, необходимые для инициации процессов кавитации в зоне расплава с помощью импульсного лазерного источника. Также были найдены мощности импульсного лазера для возникновения оптоакустического эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ FUUE-2024-0011).

### Литература

- [1] Todaro C. et al. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound // Nature Communications. 2020. (11). С. 142.
- [2] Gruzd S. A. et al. Analysis of the Effect of Magnetic Field on Solidification of Stainless Steel in Laser Surface Processing and Additive Manufacturing // Metals. 2022. № 9 (12).
- [3] Todaro C. J. [и др.]. Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2020.
- [4] Eskin D. G. et al. Fundamental studies of ultrasonic melt processing // Ultrasonics Sonochemistry. – 2019. – Т. 52. – С. 455-467.
- [5] Sohn H. et al. Real-time porosity reduction during metal directed energy deposition using a pulse laser // Journal of Materials Science & Technology. – 2022. – Т. 116. – С. 214-223.
- [6] Kruger S. E., Lord M. Ultrasonic wave generation by lasers on different metal surfaces 2007.C. 209–216.

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КРОВОТОКА И ЭРИТРОЦИТОВ ПРИ РАЗВИТИИ ОНКОПАТОЛОГИИ

Фашевский А.П.<sup>1</sup>, Лазарева Е.Н.<sup>1,2</sup>, Мыльников А.М.<sup>3</sup>, Наволокин Н.А.<sup>3</sup>, Янина И.Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

<sup>2</sup> Томский национальный исследовательский государственный университет, Томск

<sup>3</sup> Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов

[irina-yanina@yandex.ru](mailto:irina-yanina@yandex.ru)

Метод доплерографии является одним из самых современных способов оценки состояния мелких и крупных сосудов, позволяющих оценить кровоток и в некоторых случаях измерить его направление и скорость [1,2]. В медицине доплерография активно применяется для оценки кровоснабжения доброкачественных и злокачественных новообразований с целью выявления усиления васкуляризации - одного из признаков злокачественности процесса [3]. Функционализированные апконверсионные наночастицы представляют собой один из перспективных материалов для развития методов фотодинамической терапии, который позволяет не только повысить эффективность терапии, но и расширить диагностический инструментарий. Сшивка фотодинамического красителя с оболочкой наночастиц требует дополнительного покрытия их поверхности. Нанооболочки сывороточного альбумина биосовместимы со многими типами клеток в широком диапазоне концентраций [4], легко усваиваются клетками [4, 5], неиммуногенны и имеют длительный период полураспада в кровотоке [6, 7].

Изображения эритроцитов для их последующей визуализации компьютерной программой получены с помощью микроскопа с широкополосным источником излучения в видимой части спектра. Исследованы диаметры и толщины эритроцитов до и после воздействия синтезированными субмикронными комплексами как *in vitro* так и *ex vivo*.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 25- 22-00144, <https://rscf.ru/project/25-22-00144/>).

### Литература

- [1] Симаков Д. В. Методы измерения скорости кровотока для диагностики различных заболеваний // Наука в современном обществе: закономерности и тенденции развития. – 2019. – с. 69-73.
- [2] Tanaka S., Kitamura T., Fujita M., Nakanishi K., Okuda, S. Color Doppler flow imaging of liver tumors // AJR. American journal of roentgenology. – 1990. – vol. 154, No.3. – p.509-514.
- [3] Stuhmann M., Aronius R., Schietzel M. Tumor vascularity of breast lesions: potentials and limits of contrast-enhanced Doppler sonography // American Journal of Roentgenology. – 2000. – vol.175, No.6. – p. 1585-1589.
- [4] Michaelis K., Hoffmann M. M., Dreis S., Herbert E., Alyautdin R. N., Michaelis M., Kreuter J., Langer K. Covalent linkage of apolipoprotein e to albumin nanoparticles strongly enhances drug transport into the brain // J. Pharmacol. Exp. Ther. – 2006. – vol. 317. – p. 1246.
- [5] Irache J. M., Merodio M., Arnedo A., Camapanero M. A., Mirshahi M., Espuelas S. Albumin nanoparticles for the intravitreal delivery of anticytomegaloviral drugs // Mini Rev. Med. Chem. – 2005. – vol. 5. – p.293.
- [6] Loureiro A., Azoia N. G., Gomes A. C., Cavaco-Paulo A. Albumin-Based Nanodevices as Drug Carriers // Curr. Pharm. Des. – 2016. – vol. 22. – p. 1371-1390.
- [7] An F. F., Zhang X. H. Strategies for Preparing Albumin-based Nanoparticles for Multifunctional Bioimaging and Drug Delivery // Theranostics. – 2017. – vol. 7. – pp. 3667-3689.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ПРОСЕДАНИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Фёдоров А.Ю., Матвеев В.П.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[fedorov@icmm.ru](mailto:fedorov@icmm.ru), [mvp@icmm.ru](mailto:mvp@icmm.ru)

Подземные трубопроводы могут пересекать сотни километров местности с различными экологическими и геотехническими условиями. Вдоль определённых участков трубопровод может испытывать воздействия от перемещений грунта, вызванных его проседанием, пучением при промерзании, сходом оползней на склонах, поверхностными нагрузками, вмешательством других структурных объектов, таких как: реки, туннели, горные выработки. При перемещениях грунта заглублённые в нём трубопроводы могут чрезмерно деформироваться.

Для оценки критического состояния подземных трубопроводов необходимо знать значения деформаций или напряжений в трубопроводе, которые возникают в результате деформационных процессов в окружающем грунте. Изменение рельефа земной поверхности отражает деформационные процессы в грунтовом массиве и деформацию трубопровода. Существуют разные варианты дистанционного зондирования рельефа земной поверхности: авиационными и космическими средствами и беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Дистанционное зондирование рельефа земной поверхности позволяет определить деформации земной поверхности. Для мониторинга механического состояния трубопровода необходимо установить взаимосвязь между деформациями земной поверхности и деформациями заглублённого трубопровода. Для решения данной задачи предлагается методика численного моделирования.

При построении модели деформируемого грунтового массива конечных размеров использован механизм появления деформаций, связанный с нарушением однородности грунтового массива, которое задаётся формированием в массиве на глубине  $H$  полости заданной геометрии и объёма. Выбранный механизм появления деформаций отражает как природные процессы, например, появление карстовых пустот, так и техногенные процессы, связанные с различными подземными работами. Рассмотрены различные формы полостей с сечением в виде: полукруга, круга, эллипса, полуэллипса, прямоугольника. Для каждой формы проварьированы отношения геометрических параметров и глубина залегания полости. Результаты численного моделирования позволили получить размеры модели грунтового массива конечных размеров с полостью, при которых модель соответствует варианту полубесконечного грунтового массива с аналогичной полостью.

С найденными размерами построенная модель дополняется встроенным в грунтовой массив трубопроводом, залегающим на глубине  $h$ . На поверхности контакта грунта и трубы рассмотрены разные граничные условия: условия трения и условия идеального прилипания. Численная реализация рассматриваемой трёхмерной задачи теории упругости выполнена методом конечных элементов с использованием пакета программ ANSYS. В результате расчётов продемонстрирована возможность получения коэффициентов, устанавливающих взаимосвязь максимальных деформаций на земной поверхности и максимальных деформаций трубопровода, залегающего на определённой глубине в грунтовом массиве. Определена относительная глубина расположения полости, ниже которой её форма перестаёт влиять на коэффициент передачи деформаций.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-77-30008.

## ТЕНЗОРНАЯ КОРРЕКТИРОВКА РАСЧЕТА ПРОИЗВОДНЫХ В МЕТОДЕ SPH

Федоров Е.В., Майер А.Е.

Челябинский государственный университет, Челябинск  
[fedorov.e.v@csu.ru](mailto:fedorov.e.v@csu.ru), [mayer@csu.ru](mailto:mayer@csu.ru)

Поведение материала, подвергнутого экстремальным деформациям, всегда представляло большой интерес как с физической, так и с инженерной точки зрения. В первой половине 20 века была разработана теория для описания больших деформаций [1], которая, в наши дни, ещё более востребована чем раньше, благодаря развитию междисциплинарных направлений, таких как мягкие роботы, механические модели биологических тканей и т.д. Однако наиболее развитые сегодня методы моделирования, такие как метод конечных элементов, не были предназначены для описания больших деформаций, и такая постановка эксперимента является их слабым местом. В то же время, такой бессеточный метод, как SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) [2,3], устойчив к любому изменению геометрии, однако также имеет существенный недостаток – низкую точность вычислений, особенно на границах, обусловленную малым количеством соседей. Для решения этой проблемы можно пойти путем увеличения числа рассматриваемых соседей для каждой частицы, но такой подход сильно снижает эффективность расчета, с точки зрения нагрузки на вычислительную машину. Вторым путем – доработка метода. Например, в [4] была предложена корректировка вычисления производных на основе разложения в ряд Тейлора.

В данной работе предложена новая тензорная корректировка метода SPH для повышения точности расчетов. Помимо повышения точности метода SPH для граничных частиц, корректировка улучшает вычисления и производных во внутренних точках. Эффективность предложенной корректировки была продемонстрирована на нескольких разнообразных аналитических функциях одного и трех аргументов, а также на моделировании одноосного упругого сжатия в формализме конечных деформаций с жестко закрепленными границами.

Работа выполнена за счет Российского научного фонда (проект № 24-19-00684, <https://rscf.ru/project/24-19-00684/>).

### Литература

- [1] Murnaghan, F. D., Finite deformations of an elastic solid // American Journal of Mathematics – 1937. – т.59, №2. – с. 235-260.
- [2] Monaghan J. J., An introduction to SPH // Computer Physics Communications – 1998. – т. 48. – с. 89–96.
- [3] Monaghan J.J., Smoothed particle hydrodynamics // Reports on Progress Physics – 2005. – т. 68. – с. 1703–1759.
- [4] Stranex T., Wheaton S., A new corrective scheme for SPH // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 2011. – Т. 200. – №. 1-4. – С. 392-402.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТУРБУЛЕННЫХ РЕЖИМОВ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ДИАГРАММЕ РОССБИ-РЕЙНОЛЬДСА

Филатов С.В.

*Институт теоретической физики РАН им. Ландау, Черногловка  
fillsv@issp.ac.ru*

При вращении системы с жидкостью наблюдается двумеризация движения: вертикальные градиенты скорости подавляются под действием силы Кориолиса, что делает движение квази-двумерным, однородным вдоль оси вращения. Такие течения, как и чисто двумерные [1], способны образовывать долгоживущие когерентные вихри [2–4], ответственные за массоперенос. Например эти явления имеют значение для атмосферы, где вихри влияют на климат.

Экспериментальное исследование [4] изучало когерентные вихри в герметичном кубе с водой, вращающемся вокруг вертикальной оси. Турбулентное течение возбуждалось мешалками, расположенными в углах куба. При высокой скорости вращения формировалось до 10–15 циклонов, перемещающихся вдоль средних течений, взаимодействующих и сливающихся друг с другом. Их время жизни значительно превышало время Экмана, характерное для затухания вращающейся турбулентности. При снижении скорости вращения куба наблюдалось уменьшение числа вихрей до 3–6. Размеры и энергия циклонов увеличивались, что объясняется перераспределением энергии в системе. В переходном режиме оставалось 1–3 циклона, сосредоточенных на периферии, тогда как в центре куба стабильно формировался крупный антициклон. Несмотря на циклон-антициклонную асимметрию, присущую вращающейся турбулентности, антициклон сохранял стабильность за счёт взаимодействия с циклонами. При дальнейшем снижении скорости вращения антициклон оставался единственным крупным вихрем, занимая центральную область, в то время как периферийные области начинали приобретать трёхмерные характеристики. При ещё меньших скоростях вращения сила Кориолиса ослабевала настолько, что двумеризация исчезала полностью, и система переходила в режим трёхмерной турбулентности.

Для описания таких режимов применяются два безразмерных параметра: число Рейнольдса, определяющее степень турбулентности, и число Россби, характеризующее влияние силы Кориолиса. Эти параметры позволяют классифицировать наблюдаемые турбулентные состояния.

Таким образом, экспериментально изучены различные режимы вращающейся турбулентности, включая неожиданные свойства антициклонов, их устойчивость и взаимодействие с циклонами. Результаты дополняют теоретические представления о поведении турбулентных систем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №23-72-30006.

### Литература

- [1] Laurie, Jason, et al. Universal profile of the vortex condensate in two-dimensional turbulence. // *Physical review letters* - 2014 - 113.25 - p 254503.
- [2] McEwan, A. D. Angular momentum diffusion and the initiation of cyclones. // *Nature* - 1976 - 260.5547 - 126-128.
- [3] Godeferd, Fabien S., Frédéric Moisy. Structure and dynamics of rotating turbulence: a review of recent experimental and numerical results. // *Applied Mechanics Reviews* - 2015 - 67.3 - p 030802.
- [4] Tumachev D., Filatov S., Vergeles S., Levchenko A., Two dynamical regimes of coherent columnar vortices in rotating fluid // *JETP Letters* - 2023 - 118, pp 426–432.
- [5] Kolokolov, I. V., L. L. Ogorodnikov, and S. S. Vergeles. "Structure of coherent columnar vortices in three-dimensional rotating turbulent flow. // *Physical Review Fluids* - 2020 - 5.3 - p 034604.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ СВОБОДНОПЛАВАЮЩЕГО ЗЕРКАЛЬНОГО ПОГРУЖЕННОГО ТЕЛА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ ДНА

Филимонов С.А.<sup>1</sup>, Гаврилов А.А.<sup>1</sup>, Литвинцев К.Ю.<sup>1</sup>, Фрик П.Г.<sup>2</sup>, Сухановский А.Н.<sup>2</sup>,  
Васильев А.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

[bdk@inbox.ru](mailto:bdk@inbox.ru), [gavand@yandex.ru](mailto:gavand@yandex.ru), [sttupick@yandex.ru](mailto:sttupick@yandex.ru), [frick@icmm.ru](mailto:frick@icmm.ru), [san@icmm.ru](mailto:san@icmm.ru),  
[vasiliev.a@icmm.ru](mailto:vasiliev.a@icmm.ru)

Представлены результаты моделирования двумерных движений диска, плавающего в заполненной водой кювете квадратной формы на некотором расстоянии от дна (см. рис. 1а). Сверху на кювету направлен радиационный тепловой поток, который нагревает дно кюветы: форма распределения радиационного потока без учета диска показана на рис. 1б, под диском образуется тень. Нагрев дна вызывает конвективные течения, которые увлекают за собой диск. Размеры кюветы и диска соответствуют размерам кюветы из работы [1]. Численное моделирование нестационарной конвекции в полости со свободно плавающим теплоизолирующим телом внутри объема жидкости реализовано в программном комплексе «SigmaFlow» [2]. Система уравнений, описывает конвективное течение ньютоновской несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска. Пример траектории движения центра диска показан на рис. 1в. В докладе представлены интегральные и локальные характеристики конвективного течения жидкости и потоков тепла, а также результаты анализа движений погруженного диска.

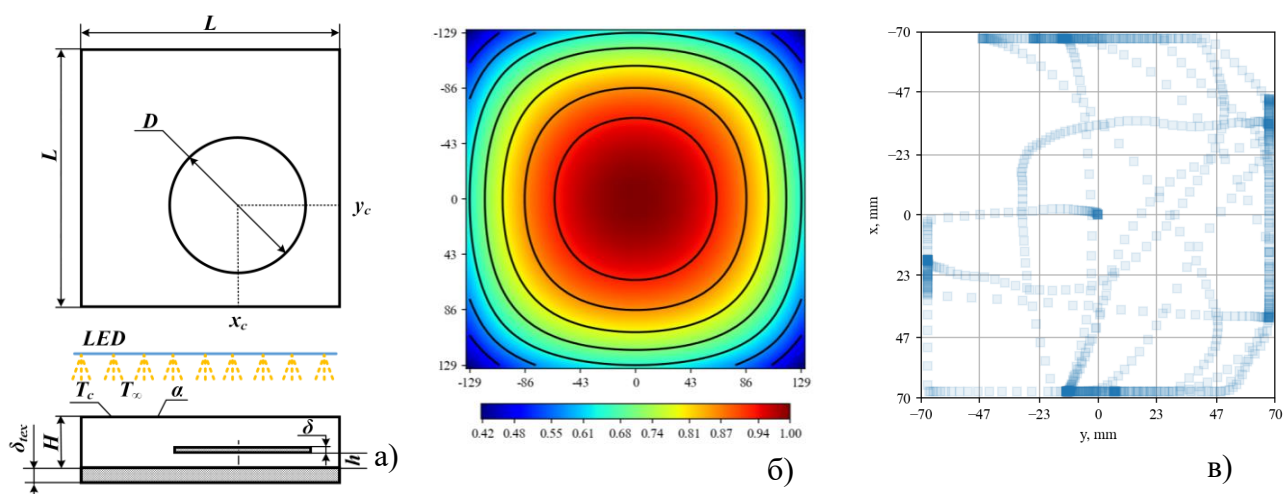


Рис.1 а) Постановка задачи, б) распределение теплового потока, в) траектория движения диска

Исследование движения пластины с радиационным нагревом выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098. <https://rscf.ru/project/22-61-00098>.

Разработка математической модели переноса радиационного излучения выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН 124062400029-2.

### Литература

- [1] Frick P. et al. A random 2D walk of a submerged free-floating disc in a convective layer // Phys. D Nonlinear Phenom. 2023. Vol. 455. P. 133882.  
[2] Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.В. Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач // Сборник статей. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. — 2010. — Т. 4, № 2. — С. 117–122.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ В ГЦК МЕТАЛЛАХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА**

Фомин Е.В.<sup>1,2</sup>, Брюханов И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*НИИ Механики, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва*

<sup>2</sup>*Челябинский государственный университет, Челябинск*

*fomin33312@gmail.com*

Микроструктура металлов и сплавов, а именно распределение границ зерен и средний размер зерен, в значительной степени определяет прочность и механические свойства данных материалов [1, 2], также как и протекание пластической деформации [2]. Это обусловило широкое развитие инжиниринга границ зерен для ГЦК металлов в последнее десятилетие [3].

Основной целью данной работы является разработка эмулятора на основе методов машинного обучения (МО) для описания эволюции микроструктуры в ГЦК металлах. В эмуляторе используется комбинация сверточных и рекуррентных слоев: сверточные слои обрабатывают и сокращают входные данные, а рекуррентные слои определяют динамику системы [4].

Данные для обучения, валидации и тестирования получены путем численного моделирования многоуровневой модели. В этой модели материал описывается в рамках механики сплошной среды, а микроструктура представлена с помощью метода клеточных автоматов [5]. Верификация модели МО проводится путем сравнения ее предсказаний с экспериментальными данными, полученными на полированных деформированных и недеформированных образцах.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-71-00078, <https://rscf.ru/en/project/24-71-00078/>.*

### **Литература**

- [1] Mukherjee T., Elmer J.W., Wei H.L., Lienert T.J., Zhange W., Kou S., DebRoy T. Control of grain structure, phases, and defects in additive manufacturing of high-performance metallic components // *Prog. Mater Sci.* – 2023. – V. 138. – P. 101153.
- [2] Figueiredo R.B., Kawasaki M., Langdon T.G. Seventy years of Hall-Petch, ninety years of superplasticity and a generalized approach to the effect of grain size on flow stress // *Prog. Mater Sci.* – 2023. – V. 137. – P. 101131.
- [3] Guan X.J., Shi F., Ji H.M., Li X.W. A possibility to synchronously improve the high-temperature strength and ductility in face-centered cubic metals through grain boundary engineering // *Scr. Mater.* – 2020. – V. 187. – P. 216–220.
- [4] Yu W., Gonzalez J., Li X., et al. Fast training of deep LSTM networks with guaranteed stability for nonlinear system modelling // *Neurocomputing* – 2021. – V. 422. – P. 85–94.
- [5] Fomin E.V. Study of the Motion of the Grain Boundaries Ensemble in Pure Aluminum at High Temperatures by Cellular Automata and Machine Learning Methods // *Chelyabinsk Phys. Math. J.* – 2024. – V. 9. – Iss. 4. – P. 689–702.



## ДЛИТЕЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СОСТАВНОГО РАСТЯГИВАЕМОГО СТЕРЖНЯ В ПРОЦЕССЕ ПОЛЗУЧЕСТИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ АКТИВНОЙ СРЕДЫ

Фомин Л.В.<sup>1</sup>, Далинкевич А.А.<sup>1,2</sup>, Басалов Ю.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Москва

<sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Москва  
[leonid1975@mail.ru](mailto:leonid1975@mail.ru), [dalinckevich@yandex.ru](mailto:dalinckevich@yandex.ru), [basalov@yandex.ru](mailto:basalov@yandex.ru)

Исследование основывается на кинетической теории ползучести и длительной прочности Ю.Н. Работнова [1]. Определяются напряженно-деформированное состояние и время до разрушения в условиях ползучести [2, 3] составного растягиваемого стержня прямоугольного поперечного сечения, находящегося в активной среде. Используются степенная и дробно-степенная модели ползучести и длительного разрушения. Сингулярная дробно-степенная модель содержит естественную механическую характеристику - предел кратковременной прочности при соответствующей температуре. Влияние активной среды рассматривается в двух вариантах: классический и неклассический диффузионные процессы. В последнем случае проникшее в материал активное вещество находится в двух состояниях: свободном и связанном. Процесс такой диффузии описывается модифицированным уравнением диффузии, учитывающим двухфазное состояние активного вещества в материале [4]:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t}, \quad \frac{\partial S}{\partial t} = \beta c - \alpha S, \quad c(z, 0) = S(z, 0) = 0$$

где  $c$  - концентрация свободной (мобильной) формы активной среды в единице объема (или на единицу массы) образца;  $S$  - концентрация связанной формы активной среды в единице объема (или на единицу массы) образца;  $D = \text{const}$  - коэффициент диффузии;  $\alpha, \beta$  - параметры диффузионной модели,  $z$  - координата;  $t$  - время.

Учет влияния активной среды производится путем введения в кинетические уравнения функции влияния активной среды – функции от интегрально средней концентрации. Материальные и диффузионные параметры модели могут быть определены из необходимых установочных экспериментов. На основе кинетической теории с двумя структурными параметрами, а именно, поврежденности и концентрации элементов активной среды в материале, получена результирующая система уравнений для определения зависимостей напряжений и повреждений от времени в процессе ползучести, проводится их анализ в различных частях составного стержня. Предложена критериальная оценка определения времени до разрушения как отдельных частей, так всей рассматриваемой стержневой системы в целом. Результирующая система моделирует ползучесть составного стержня вплоть до разрушения, критерием которого является достижение параметром поврежденности значения, равного единице.

### Литература

- [1] Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
- [2] Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит. 2016. 504 с.
- [3] Lokoshchenko A., Fomin L. Kinetic Theory of Creep and Long-Term Strength of Metals, in Kinetic Theory, George Z. Kyzas and Athanasios C. Mitropoulos IntechOpen, (December 20th 2017). DOI: 10.5772/intechopen.70768
- [4] Crank J. The Mathematics of diffusion. 2nd edition. 1975. 414 p.

## О ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЙ В РЯДАХ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВБЛИЗИ ТРЕЩИНЫ В ЛИНЕЙНО УПРУГИХ ТЕЛАХ

Фомченкова М.А.<sup>1</sup>, Степанова Л.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара  
[fomchenkova.ma@ssau.ru](mailto:fomchenkova.ma@ssau.ru), [stepanova.lv@ssau.ru](mailto:stepanova.lv@ssau.ru)

Степенные ряды М. Уильямса, представляющие напряжения и деформация у вершины трещины, и их обобщение на анизотропные линейно упругие среды, являются одним из наиболее предпочтительных аналитических инструментов для описания механических полей вблизи вершин трещин и угловых вырезов в плоских задачах механики разрушения:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \sum_{m=1}^{m=3} \sum_{k=0}^{k=\infty} a_k^m r^{k-1/2} f_{m,ij}^{(k)}(\theta). \quad (1)$$

Для практического использования эти ряды, как правило, усекаются. Считается [1, 2], что чем больше слагаемых сохраняется в (1), тем точнее будет представление (1). На рис. 1 показаны угловые распределения напряжений у вершины трещины продольного сдвига, построенные с помощью многопараметрических разложений (1), усеченных на различном количестве слагаемых. Асимптотические разложения (1) сходятся в пределах кругов сходимости рядов, но усеченные ряды также могут давать точные значения для поля напряжений. Это свойство можно легко наблюдать с помощью картин логарифмов от абсолютной погрешности, приведенных на рис. 2, сравнивающих усеченные последовательные решения для напряжений с точными решениями. На кривых, исходящих от вершины трещины (рис. 2), остаток ряда оказывается равным нулю. Показано, что их число и начальные углы связаны с нулями собственных функций М. Уильямса, которые зависят от количества слагаемых ряда.

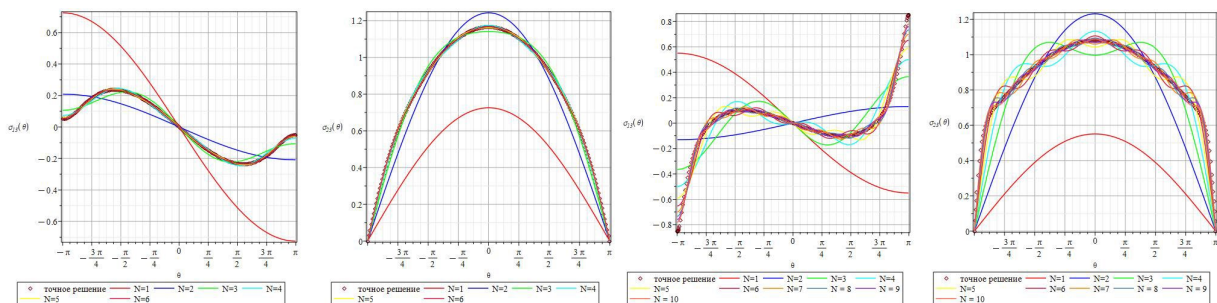


Рис. 1. Угловые распределения напряжений у вершины трещины антиплоского сдвига согласно точному решению и решению в рядах на расстояниях  $\bar{r} = r/a = 0.75$  и  $\bar{r} = 1.65$ , где  $a$  - половина длины трещины

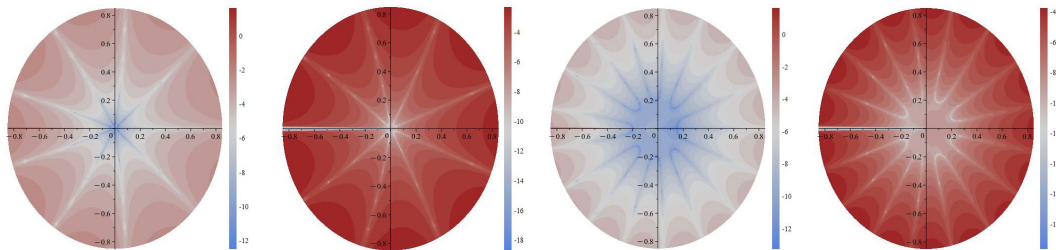


Рис. 2. Картины абсолютной погрешности, допускаемой решением в рядах, по сравнению с точным решением: компоненты  $\sigma_{13}$  и  $\sigma_{23}$ , усеченные на 5 слагаемых (1 и 2 рисунки); усеченные на 9 слагаемых (3 и 4 рисунки)

### Литература

- [1] Степанова Л.В., Фомченкова М. А. О точности усеченных разложений полей у вершины трещины в анизотропных средах // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Т. 86. – № 4. – С. 403-420.  
 [2] Фомченкова М. А., Степанова Л.В., Процедура переопределенного метода нахождения коэффициентов разложения полей у вершины трещины, основанная на конечно-элементном решении для компонент тензора напряжения // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. – 2024. – Т. 30. – № 2. – С. 54-66.

## СВЯЗАННЫЕ ЗАДАЧИ ХЕМОМЕХАНИКИ ДЛЯ УПРУГОГО И ВЯЗКОУПРУГОГО ПРОДУКТА РЕАКЦИИ

Фрейдин А.Б.<sup>1</sup>, Иванова А.Б.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

[alexander.freidin@gmail.com](mailto:alexander.freidin@gmail.com), [alezandraivanova@mail.ru](mailto:alezandraivanova@mail.ru)

Рассматривается химическая реакция между диффундирующим и упругим компонентами. Реакция локализована на фронте реакции, разделяющим превращенный и исходный материалы, поддерживается диффузией диффундирующего компонента через превращенный материал и сопровождается деформацией превращения и, вообще говоря, изменением реологических свойств материала, вследствие чего упругий материал может превратиться в вязкоупругий. Примерами такой реакции являются реакции окисления или литизации кремния.

В отличие от случая упругих компонентов реакции, напряжения могут релаксировать, если в результате превращения даже изначально упругого тела появляется вязкоупругий материал. Это приводит к связанности кинетики распространения фронта химического превращения и процесса релаксации напряжений. В настоящей работе продолжено исследование случая вязкоупругого продукта реакции, начатое в [1], где был рассмотрен плоский фронт химической реакции в пластине, распространяющийся в результате реакции, при которой упругий материал превращается в вязкоупругий. Напряжения влияют на скорость фронта реакции через нормальную компоненту тензора химического сродства [2]. В [1] исследовался случай свободной поверхности пластины. Поэтому вследствие объемного расширения, сопровождавшего реакцию, возникали только напряжения, действующие на площадках, перпендикулярных фронту. Эти напряжения релаксировали затем в области позади фронта, но процесс релаксации не оказывал влияния на распространение фронта.

В настоящем докладе рассмотрен случай, когда на верхней поверхности пластины заданы перемещения, которыми предписывается средняя внешняя деформация. Это приводит к росту напряжений по мере продвижения фронта, релаксация которых оказывает существенное влияние на распространение фронта реакции. Вначале приводятся результаты исследований кинетики и блокирование распространения фронта реакции в случае упругих компонентов реакции; делается акцент на влияние соотношения модулей упругости упругих компонентов на блокирующие напряжения. Затем исследуется случай вязкоупругого продукта реакции. Для выделения ключевых факторов рассматривается одномерная задача о распространении фронта реакции вдоль стержня, один конец которого закреплен, а на втором задано перемещение. Затем рассматривается пластина и отмечается, что нового дает постановка плоской деформации по сравнению с 1D-постановкой. Демонстрируется принципиальная разница протекания химической реакции в случае упругого и вязкоупругого продуктов реакции.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8).

### Литература

[1] Petrenko S., Freidin A.B., Charkaluk E. On chemical reaction planar fronts in an elastic – viscoelastic mechanical framework // Continuum Mech. Thermodyn. – 2022 – V. 34 – P. 137–163.

[2] Freidin A. B. Chemical affinity tensor and stress-assist chemical reactions front propagation in solids. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. V. 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids. – V009T10A102. – 2013.

## РЕДКОИНВЕРСНЫЙ ХАОС В МОДЕЛИ ДИНАМО РИКИТАКЕ

Фрик П.Г.<sup>1,2</sup>, Плешков Р.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

[frick@icmm.ru](mailto:frick@icmm.ru), [pleshkov\\_ra@mail.ru](mailto:pleshkov_ra@mail.ru)

Двухдисковое динамо Рикитаке представляет собой простую динамическую модель случайных инверсий геомагнитного поля, описываемую системой четырех ОДУ. Хаотический аттрактор возникает в определенной области управляющих параметров, характеризующих омическую диссипацию и соотношение скоростей вращения двух дисков в стационарном состоянии.

Модель Рикитаке известна почти 70 лет, но лишь недавно в ней были найдены решения, отличающиеся редкими инверсиями знака поля, которые своим поведением напоминают смену полярности геомагнитного поля [1]. В этих решениях долгие квазистационарные решения (суперхроны) сменяются сериями из более коротких хронов, после чего снова происходит выход на квазистационарное решение (рис 1). В докладе представлены результаты анализа связи продолжительности хрона с характеристиками системы в его начальной фазе и попытки понять, можно ли на основе уже имеющихся данных оценить возможную длительность пребывания решений в квазистационарном состоянии. На рис.2 показан пример зависимости длительности хрона от начальных амплитуд колебаний.

В докладе представлены также результаты моделирования влияния слабых периодических воздействий на наблюдаемый редкоинверсный хаос. Интерес к этой проблеме обусловлен возможным воздействием вращающихся вокруг Солнца планет на поведение магнитного поля отдельного космического тела.

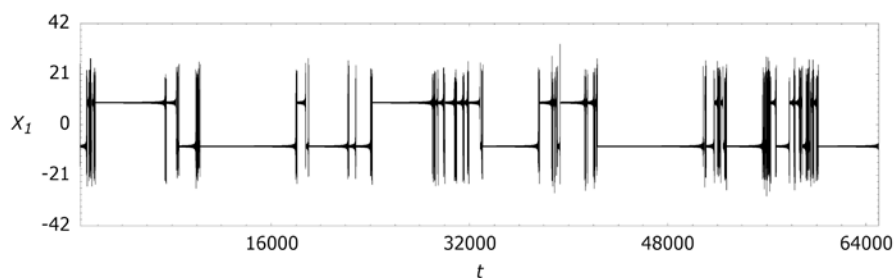


Рис. 1. Решение с редкими инверсиями, возникающее в системе при малом параметре вязкого трения.

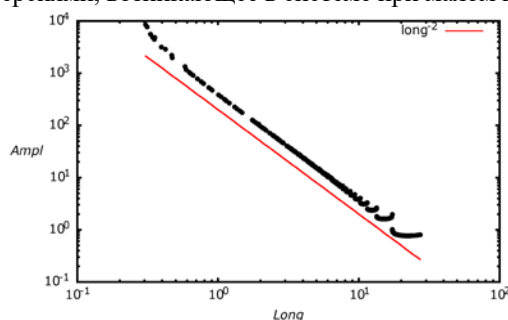


Рис. 2. Зависимость продолжительности хрона от начальной амплитуды в двойных логарифмических координатах. Красной линией показан степенной закон «-2».

### Литература

[1] Frick P. G., Pleshkov R. A., Rare-reversal chaos in two-disk dynamo models // Phys. Rev. E. 2024. — . Vol. 110, no. 6. P. 064203.

## РАВНОВЕСИЕ УПРУГОЙ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ СФЕРЫ, ЖЕСТКО ЗАКРЕПЛЕННОЙ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАССОВЫХ СИЛ

Фукалов А.А.<sup>1</sup>, Зайцев А.В.<sup>1</sup>, Баяндин Ю.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь

[mr\\_aa@mail.ru](mailto:mr_aa@mail.ru), [a-zaitsev@mail.ru](mailto:a-zaitsev@mail.ru), [buv@icmm.ru](mailto:buv@icmm.ru)

Вопрос о корректности полученных в вычислительных экспериментах при решении научных и инженерных задач результатов возникает наиболее остро (из-за ограниченного количества задач, имеющих аналитические решения) при необходимости учета анизотропии деформационных и прочностных свойств материалов. С использованием разложения компонент вектора перемещений по окружной и радиальной координатам в ряды по полиномам Лежандра и обобщенные степенные ряды получено аналитическое решение задачи о равновесии жестко закрепленной на внешней поверхности толстостенной трансверсально-изотропной полой сферы, находящейся под действием равномерного внутреннего давления и массовых сил [1].

Полученное аналитическое решение позволило проанализировать распределение независимых инвариантов тензора напряжений в поперечном сечении жестко закрепленной на внешней поверхности тяжелой железобетонной сферы со свободной внутренней поверхностью. На основе многокритериального подхода, описывающего различные механизмы исчерпания несущей способности (от растяжения или сжатия в радиальном и окружном направлениях и межслойного сдвига), определены области тяжелой железобетонной сферы, в которых может быть инициировано разрушение [2–4].

Проведено качественное и количественное сравнение полей напряжений в точках поперечных сечений толстостенных тяжелых сфер с результатами численного решения той же задачи в осесимметричной и трехмерной постановках в конечноэлементных пакетах. Численно определенные значения инвариантов напряжений продемонстрировали минимальное отклонение от аналитического решения в осесимметричной постановке и различие с сопоставимой погрешностью – в трехмерной. В последнем случае представление численных результатов для напряжений и деформаций в компонентной форме привело к неожиданному эффекту – появлению существенных ошибок по сравнению с точным аналитическим решением. Для исключения обнаруженных при определении напряженно-деформированного состояния ошибок, которые обусловлены только особенностями определения сферической системы координат в конечноэлементных пакетах, необходимо использовать представление полученных результатов в инвариантном виде [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 25–21–00442).

### Литература

- [1] Фукалов А.А., Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Баяндин Ю.В. Равновесие жестко закрепленной на внешней поверхности полой трансверсально-изотропной толстостенной сферы, находящейся под действием равномерного внутреннего давления и гравитационных сил // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. - 2021. - Т. 25, № 2. - С. 303–319.
- [2] Зайцев А.В., Фукалов А.А. Упругое равновесие тяжелой трансверсально-изотропной толстостенной сферы с жестко закреплённой внутренней поверхностью // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2010. – № 5(21). – С. 85–95.
- [3] Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А. Механизмы начального разрушения железобетонной крепи сферической горной выработки в массиве осадочных пород // Вестник ПНИПУ. Механика. - 2013. - №4. - С. 59–74.
- [4] Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А. Равновесие жестко закрепленных по внешней поверхности тяжелых упругих анизотропных тел с центральной симметрией в поле гравитационных сил // Вестн. Кыргызско-Российского Славянского ун-та. – 2017. – Т. 17, № 8. – С. 13–17.

## ТРАНСПОРТ ПРИМЕСИ ЧЕРЕЗ НАКЛОННУЮ ПОРИСТУЮ КОЛОННУ

Хабин М.Р.<sup>1</sup>, Марышев Б.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
[khabin.m@icmm.ru](mailto:khabin.m@icmm.ru), [bmaryshev@icmm.ru](mailto:bmaryshev@icmm.ru)

Решается задача о транспорте примеси через вытянутую наклонную прямоугольную область, заполненную пористой средой в поле тяжести. Транспорт описывается в рамках ММ подхода [1], разделяющего примесь на две фазы: мобильную и иммобильную. Первая фаза определяет концентрацию частиц примеси, переносимых вместе с потоком несущей жидкости, а вторая концентрацию частиц, осевших на скелете пористой среды. В данном подходе для замыкания системы требуется введение кинетического уравнения, описывающего переход между фазами мобильности (процессы сорбции). В данной работе используется нелинейная ММ модель [2], учитывающая наличие предельной концентрации способной осесть на стенках пор (концентрация насыщения иммобильной компоненты). Фильтрация моделируется законом Дарси в приближении Дарси-Буссинеска [3], что позволяет учесть влияние гравитации на течение неоднородной по плотности жидкости, и как следствие, возникновение концентрационной конвекции. Оседание примеси на стенки пор твердой матрицы пористой среды уменьшает пористость и проницаемость среды, приводя к её закупориванию. Зависимость проницаемости от пористости задается уравнением Козени-Кармана [4]. Рассматривается двумерное течение через вытянутую прямоугольную область. Такая постановка моделирует стандартный эксперимент позволяющий оценивать параметры транспорта примеси через пористую среду – транспорт через пористую колонну. Граничные условия задаются следующим образом, на одной из коротких границ (вход) задается поток смеси с заданной концентрацией примеси, таким образом, осуществляется закачка конечного объема смеси. На противоположной границе (выход) ставится условие свободного вытекания. Длинные границы считаются непроницаемыми для жидкости и примеси. Жидкость прокачивается под действием постоянного перепада давления между короткими границами. В начальный момент времени область свободна от примеси. Область наклонена относительно горизонтали на заданный угол. Задача решается численно, методом конечных разностей с использованием схемы переменных направлений для транспортного уравнения (параболический тип) и схемы Ричардсона для уравнения описывающего поле давления (эллиптический тип). Исследуется влияние наклона области на транспорт примеси. Получены поля основных переменных: давления, концентрации мобильной и иммобильной фазы для различных значений углов. Оценено влияние наклона на скорость фильтрации на выходе из области. Показано, что увеличение угла наклона уменьшает время выноса примеси из области.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124021600038-9.

### Литература

- [1] Deans H. A. A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1963. – vol. 3. – №. 01. – p. 49-52.
- [2] P. Gouze, T. Le Borgne, R. Leprovost, G. Lods, T. Poidras, P. Pezard Non-Fickian dispersion in porous media: 1. Multiscale measurements using single-well injection withdrawal tracer tests // Water Resources Research. –2008. –Т. 44. – №. 6.
- [3] Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. Springer, – 2017, p.628
- [4] Carman P. C. Fluid flow through granular beds // Trans. Inst. Chem. Eng. London. – 1937. – vol. 15. – p. 150-156.

## НАТРИЕВЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Халилов Р.И.<sup>1</sup>, Балашов В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«ИМСС УрО РАН», Пермь

<sup>2</sup>ООО «НИЦ МСС», Пермь

[khalilov@icmm.ru](mailto:khalilov@icmm.ru)

Натриевый испытательный стенд разработан для проведения испытаний электромагнитных насосов и другого оборудования, работающего с жидким натрием. Благодаря возможности тестирования устройств в различных конфигурациях, как вертикальных, так и горизонтальных, стенд демонстрирует высокую универсальность и адаптируемость к различным производственным условиям.

Стенд способен воспроизводить экстремальные рабочие условия с температурой натрия до 450°C, что позволяет точно моделировать реальные эксплуатационные сценарии. Система выдерживает давление до 0,9 МПа, обеспечивая надежность при высоких нагрузках. Диаметр основного трубопровода составляет 100 мм, что способствует поддержанию необходимого уровня пропускной способности для проведения испытаний в широком диапазоне потоков, включая максимальный расход натрия до 150 м<sup>3</sup>/ч.

В конструкцию стенда входит замкнутая петля трубопроводов, которая оснащена креплениями для тестируемого оборудования. Поддержку безопасных и стабильных условий испытаний обеспечивают вспомогательные системы, такие как система хранения натрия, вакуумная система для создания необходимых условий в контуре и аргоновая система для предотвращения окисления натрия.

Для обеспечения точности и надежности измерений стенд оснащен современными приборами, включая электромагнитный расходомер ПКР-7 (разработанный в «ИМСС УрО РАН») и кориолисовый расходомер ЭЛИМЕТРО. Это оборудование сертифицировано и обеспечивает высокую точность измерений, критически важную для атомной промышленности.

В 2023 году испытательная лаборатория, включающая натриевый стенд, получила аккредитацию Росатома. Этот статус подтверждает соответствие высоким стандартам и расширяет возможности лаборатории для проведения ответственных испытаний оборудования для атомных объектов, повышая доверие к результатам и укрепляя сотрудничество с отраслевыми партнерами.

Натриевый испытательный стенд является важным звеном в обеспечении надежности и безопасности оборудования атомной промышленности, способствуя развитию передовых технологий в этой сфере.

## СРЕДНЯЯ ФОРМА КАПЛИ НА ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКЕ, СОВЕРШАЮЩЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАЛОАМПЛИТУДНЫЕ ВИБРАЦИИ

Хлыбов О.А.<sup>1</sup>, Иванцов А.О.<sup>1</sup>, Любимова Т.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный университет, Пермь

[lubimova@icmm.ru](mailto:lubimova@icmm.ru)

Изучено поведение капли жидкости, помещенной на осциллирующую твердую подложку. Вибрации нормальны к плоскости подложки. Амплитуда колебаний предполагается малой по сравнению с радиусом капли, а частоты вибраций могут быть настолько высоки, что в капле возникает звуковая волна, длина которой сравнима с размерами капли. Жидкость окружает газовая среда, плотность которой мала. Влиянием силы тяжести пренебрегается.

Рассмотрены задачи о собственных и вынужденных колебаниях полусферической осесимметричной капли. Определены частоты собственных объемных колебаний. Получено решение задачи о вынужденных колебаниях сжимаемой капли в виде ряда по полиномам Лежандра с учетом поверхностного натяжения жидкости. Изучены резонансы акустической моды колебаний капли. Рассмотрена задача о вынужденных колебаниях капли в пределе слабосжимаемой жидкости. Показано, что рост амплитуды колебаний с увеличением частоты вибраций происходит по квадратичному закону.

Сформулирован вариационный принцип для сред, в которых важна сжимаемость жидкости: с течением времени функционал энергии уменьшается и достигает минимума в состоянии квазиравновесия, в котором среднее движение отсутствует. При учете сжимаемости жидкости, в отличие от несжимаемой капли [1], в функционал входит слагаемое, описывающее потенциальную энергию сжатия [2]. Изучено влияние вибраций на квазиравновесную форму капли при малом значении вибрационного параметра, равного отношению вибрационного давления к капиллярному. Предполагалось, что поверхность капли в отсутствие вибраций является полусферической. Под воздействием вибраций высота капли уменьшается, а площадь основания увеличивается. При этом деформация поверхности меняется пропорционально вибрационному параметру.

При конечных значениях вибрационного параметра квазиравновесная форма может значительно отличаться от сферической [3]. В этом случае пульсационная задача решалась численно методом граничных элементов. Для определения средней формы капли при конечных значениях вибрационного параметра использовался вариационный принцип. Полученные результаты хорошо согласуются с решением в пределе малых значений вибрационного параметра. При увеличении вибрационного параметра средний контактный угол уменьшается, площадь ее основания увеличивается, а высота уменьшается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-11-00269).

### Литература

- [1] Любимов Д.В., Любимова Т.П., Черепанов А.А. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. – М.: Физматлит, 2003. – 216 с.  
[2] Ivantsov A., Lyubimova T., Khilko G., Lyubimov D. The shape of a compressible drop on a vibrating solid plate // Mathematics. – 2024. – Vol. 11, № 21. – P. 4527.  
[3] Ivantsov A., Lyubimova T. Average deformation of sessile drop under high frequency vibrations // Microgravity Science and Technology. – 2024. – Vol. 36, № 6. – P. 58.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЗВОНОЧНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО СЕГМЕНТА L4-L5 С УЧЕТОМ СВЯЗОК: ГИПЕРРЕЦЕПЦИЯ В ФАСЕТОЧНОМ СУСТАВЕ

Хорошев Д.В., Ильялов О.Р.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[horosh-den@mail.ru](mailto:horosh-den@mail.ru)

Боль в пояснице оказывает существенное влияние на качество жизни и работоспособность населения планеты [1–3]. Врачебная практика показывает, что в половине случаев гиперрецепция [4] в пояснице связана с подвывихом фасеточных суставов. С нашей точки зрения это связано с перераспределением нагрузки в позвоночно-двигательном сегменте при дегенеративном уменьшении высоты межпозвоночного диска [5]. Вследствие этого при значительной по величине нагрузке происходит подвывих фасеточных суставов. В итоге, деформация суставных сумок и изменение площади контакта между отростками приводят к изменению давления на отростках, и вынуждают близлежащие барорецепторы подавать сигналы о наличии гиперрецепции в сегменте. Цель исследования – используя методы биомеханического моделирования, оценить влияние учета связок в позвоночно-двигательном сегменте L4–L5 на возникновение подвывиха фасеточных суставов (в зависимости от величины осевой сжимающей нагрузки). Построена трехмерная биомеханическая модель сегмента L4–L5 пациента N возраста 22 года, которая включает в себя два позвонка L4 и L5, межпозвоночный диск, два фасеточных сустава и девять видов связок. Анализ литературы по моделированию сегмента в статье, показал, что для всех работ характерно упрощенное моделирование фасеточных суставов. Описана постановка задачи в сочетании упругой задачи и задачи об идеальной жидкости для сегмента L4–L5. В качестве первого приближения предполагается использовать теорию упругости для оценки функционирования модели. Значения физических характеристик модели представлены в раннем исследовании [4]. Текущая постановка задачи моделирует травматичное нагружение позвоночно-двигательного сегмента L4–L5, при котором появляется подвывих фасеточных суставов. В качестве допущения синовиальная жидкость принята идеальной жидкостью. Связки считаются пружинами. Нижняя поверхность тела позвонка L4 жестко закреплена, а на верхнюю поверхность позвонка L5 действует нагрузка P1. На внешней поверхности пульпозного ядра приложено внутридискное давление P2 = 330 кПа. Остальные внешние боковые поверхности свободны. На границе взаимодействия твердых тел и жидкости задано равенство сил. Поставленная задача решена при помощи Ansys Workbench. Получены распределения перемещений и деформаций.

### Литература

- [1] Хорошев Д.В., Ильялов О.Р., Устюжанцев Н.Е. Биомеханическое моделирование позвоночно-двигательного сегмента L4-L5: гиперрецепция в фасеточном суставе // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете: Сборник тезисов докладов XVIII Всероссийской школы, пос. Дивноморское, 27 мая – 31 мая 2024 года. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2024. – с. 118.
- [2] Хорошев Д.В., Ильялов О.Р., Устюжанцев Н.Е. Биомеханическое моделирование поясничного фасеточного сустава // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете: Тезисы докладов XVII Всероссийской школы, Дивноморское, 28 мая – 01 июня 2023 года. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2023. – с. 115.
- [3] Хорошев Д.В., Ильялов О.Р., Устюжанцев Н.Е. Биомеханическое моделирование фасеточного сустава на уровне сегмента L4-L5 // Современные проблемы механики сплошной среды: Тезисы докладов XXI Международной конференции, Ростов-на-Дону, 11–13 октября 2023 г. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2023. – с. 117.
- [4] Хорошев Д.В., Ильялов О.Р. Персонализированное моделирование позвоночно-двигательного сегмента L4-L5 // Математическое моделирование в естественных науках. – 2023. – Т. 1. – с. 331-333.
- [5] Хорошев Д.В., Ильялов О.Р. Обзор конечно-элементных моделей межпозвоночных дисков за 2010–2014 годы // Master's Journal. – 2016. – № 2. – с. 333–339.

## СРАВНЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ МГД-ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕЙ

Хрипченко С.Ю, Тонков Е.Ю.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[khripch@icmm.ru](mailto:khripch@icmm.ru), [tonkov.e@icmm.ru](mailto:tonkov.e@icmm.ru)

В процессе затвердевания алюминиевых расплавов образуется дендритная структура, что предопределяет низкие пластические свойства отливок. Свойства сплавов могут быть улучшены путем воздействия на их структуру управляемым МГД-перемешиванием в процессе кристаллизации [1]. При генерации в теплом верхе кристаллизатора машины непрерывного литья азимутального (тороидального) и меридионального (полоидального) течения жидкого алюминия и его сплавов происходит воздействие на формирование структуры и распределение примесей в объеме кристаллизующегося слитка [2]. Тороидальное течение непосредственно влияет на формирование мелкозеренной структуры слитка, а полоидальное течение в основном обеспечивает теплоперенос и равномерное распределение примеси по объему. Такое перемешивание жидкого металла обеспечивается наличием в МГД-перемешивателях индукторов бегущего и вращающегося магнитного поля, что определяет их габариты, которые необходимо иметь как можно меньшими для обеспечения возможности размещения на литейном столе наибольшего их количества.

В работе рассмотрены несколько вариантов конструкций МГД- перемешивателей имеющих как трехфазные так и двухфазные индуктора бегущего и вращающегося магнитного поля [3,4], а так же перемешиватели имеющие только один индуктор вращающегося поля , но создающий, как тороидальное, так и полоидальное вращение жидкого металла в процессе получения слитка. Путем численного моделирования произведено сравнение между собой по эффективности этих конструкций на основании их электродинамических характеристик.

### Литература

- [1] Mapelli C., Gruttadauria A., Peroni W., Application of electromagnetic stirring for the homogenization of aluminium billet cast in a semicontinuous machine // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. - vol. 210, - pp. 306–314.
- [2] Gelfgat Yu. M., Krumins Yu., Abricka M., Motion of an electrically conducting fluid in a cylindrical volume exposed to the influence of superimposed rotating and travelling magnetic fields// Magnetohydrodynamics. - 1999. -vol. 35, №. 1.- pp. 1–12.
- [3] Хрипченко С.Ю, Халилов Р. И, Борисов В. Г; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН)(РФ) Устройство для перемешивания электропроводных жидких сред. Патент № 2827190 РФ Заявка № 2024120434; Заявл. 19.07.2024 г. Опубл. 23.09.2024, Бюл. № 27
- [4] Хрипченко С.Ю, Борисов В. Г; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН)(РФ) Устройство для перемешивания электропроводных жидких сред Патент № 2830293, Заявка. № 2024118853; заявл. 04.07.2024 г; Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 18.11.2024.

## **ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В ТЕПЛОМ ВЕРХЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МГД\_ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Хрипченко С.Ю, Тонков Е.Ю.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[khripch@icmm.ru](mailto:khripch@icmm.ru), [tonkov.e@icmm.ru](mailto:tonkov.e@icmm.ru)

Структура и свойства слитков из алюминиевых сплавов получаемых на машинах непрерывного литья могут быть улучшены путем воздействия на жидкий металл в теплом верхе кристаллизатора управляемым МГД-перемешиванием в процессе кристаллизации сплава. При помощи МГД-перемешивателя создается перемешивающее течение над фронтом кристаллизации слитка, что непосредственно влияет на его структуру и однородное распределение компонент сплава и примесей в его объеме [1,2]. Тороидальное течение у фронта кристаллизации не дает образовываться дендритам, оно размывает их при формировании, создавая много мелких центров кристаллизации и формируя мелкозернистую структуру слитка. Полоидальное течение усиливает теплоперенос от верхней части теплового верха, к фронту кристаллизации слитка. Регулируя интенсивность течения и меняя его направление можно эффективно влиять на геометрию фронта кристаллизации и на распределение компонент сплава и примесей по объему слитка.

В работе рассмотрены несколько вариантов конструкций МГД-перемешивателей имеющих как трехфазные так и двухфазные индукторы бегущего и вращающегося магнитного поля [3,4], а так же перемешиватели имеющие только один индуктор вращающегося поля, но создающий, как тороидальное, так и полоидальное вращение жидкого металла в процессе получения слитка. Путем численного моделирования произведено сравнение между собой по эффективности этих конструкций на основании их электродинамических характеристик. Существуют различные конструкции МГД-перемешивателей, которые создают различные виды перемешивающих течений. По этой причине для понимания эффективности работы различных конструкций МГД-перемешивателей важно знать картину течений которую они создают. В работе путем численного моделирования были получены картины течений создаваемых различными конструкциями МГД-перемешивателей. Было произведено сравнение эффективности перемешивания по динамическим характеристикам этих течений для различных случаев

### Литература

- [1] Borisov V.G., Production technologies of shaped articles made of aluminum alloys using the thixoforming technique// Problems and solutions. *Light Alloy Technology*. - 2016. Vol. 50, №. 2, pp 48 - 51.
- [2] Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I., Nikulin L., The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible// *Magneto hydrodynamics*. - 2014. Vol. 50, No 4, - pp. 407-422 ]

## **ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ЖЕЛЕЗОАЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ**

Худякова В.А.<sup>1</sup>, Предеин В.В.<sup>1</sup>, Жилин С.Г.<sup>1</sup>, Богданова Н.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре*  
[ms.viliena@mail.ru](mailto:ms.viliena@mail.ru)

Рост потребности машиностроения в новых функциональных материалах обусловлен расширением номенклатуры и назначения конечных изделий, на поверхности которых нанесены элементы, выполненные из интерметаллидных железоалюминиевых сплавов, обладающих набором уникальных физико-механических и эксплуатационных характеристик: стойкостью к абразивному износу, высоким температурам и агрессивным средам. Сложившаяся практика получения железоалюминиевых интерметаллидных покрытий, как правило, предполагает наличие многооперационных процессов, обуславливающих высокую итоговую стоимость металлопродукта. Разработка новых интерметаллидных сплавов, способов их получения и применения в этой связи представляется актуальной задачей [1]. В значительной мере повысить энергетическую и материальную эффективность получения сплавов системы Fe-Al позволяют одностадийные процессы высокотемпературного алюмотермического переплава в графитовых реакторах термитных шихт, в составе которых присутствуют оксиды железа и активный алюминий [2]. Серией предварительных экспериментов определены зависимости содержания компонентов исходных термитных шихт на диапазоны температур образующихся железоалюминиевых расплавов и их фазовый состав [3, 4]. Целью исследования стало определение влияния активного алюминия, входящего в состав термитных шихт и изменение теплофизических условий осуществления экзотермического процесса на диапазон значений плотности экспериментальных итоговых интерметаллидных сплавов и их микротвердость. В результате эксперимента удалось разработать комплекс мероприятий, направленных на достижение максимального выхода металлической фазы (в ряде случаев до 65% от массы исходных шихтовых материалов), содержание компонентов в итоговых сплавах, формирование интерметаллидных фаз типа Fe<sub>3</sub>Al, для которых характерны значения микротвердости в диапазоне 750-920 HV (при содержании Al в сплавах 50-55%). Полученные результаты предваряют перспективу продолжения исследований вариантов регулирования физико-механических характеристик интерметаллидных сплавов системы Fe-Al и методов их получения, что в значительной мере позволит расширить область их применения не только в качестве покрытий, но и элементов конструкций с более сложной конфигурацией и функционалом, обладающих достаточной эксплуатационной прочностью. Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

### Литература

- [1] Худякова В.А., Жилин С.Г. Получение интерметаллидных сплавов группы Fe-Al и особенности формирования их свойств// Химия. Экология. Урбанистика. 2023. Т. 4. С. 101-105.
- [2] Комаров О.Н., Предеин В.В., Жилин С.Г., Худякова В.А., Барсукова Н.В. Способ получения железоалюминиевого сплава// Патент РФ на изобретение №2803881, Оpubл. 21.09.2023, Бюл №27.
- [3] Худякова В.А., Жилин С.Г., Предеин В.В. Структура и свойства слитка интерметаллидного сплава системы Fe-Al, получаемого экзотермическим переплавом термитной шихты// Металлург. – 2024. №10. С.70-76.
- [4] Khudyakova V.A., Zhilin S.G., Predein V.V., Bogdanov N.A. Influence of technological factors on the formation of properties of intermetallide Fe-Al alloys produced by alumothermal remelting of thermite barch // International Symposium Materials and Technologies. Materials of the International Russian-Chinese Symposium. Khabarovsk, - 2024. С.4-6.

## МОНИТОРИНГ ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ КОНСТРУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ МЭМС АКСЕЛЕРОМЕТРА

Цветков Р.В.<sup>1</sup>, Гусев Г.Н.<sup>1</sup>, Епин В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*  
[flower@icmm.ru](mailto:flower@icmm.ru)

Возникновение механических колебаний и распространение их по конструкции имеет различную природу и вызывается естественными или техногенными воздействиями, такими как работа механизмов, инженерных сетей, движение транспорта, порывы ветра. Для безопасной эксплуатации сооружений и конструкций важным фактором является стабильность процесса измерений, позволяющего в течение длительного контролировать деформационные параметры конструкций, такие как ее вибрационный отклик. Механические колебания характеризуются набором разных параметров: амплитуда, частота, сдвиги фаз между сигналами и т. д. Собственные колебания конструкции также характеризуются соответствующей ей формой, показывающей, каким образом будет деформироваться исследуемая структура при колебаниях на данной частоте. Постоянство данных параметров с течением времени свидетельствует о неизменности деформационного состояния конструкции, поэтому их необходимо отслеживать для контроля ее целостности.

Развитие микроэлектроники и технологий в последние десятилетия позволило создавать новые измерительные устройства на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), в том числе и акселерометры. Невысокая цена, малые размеры и низкое потребление энергии позволяют создавать автономные устройства, которые можно объединять в системы для регистрации динамических параметров различных конструкций. Из многообразия доступных акселерометров представляют интерес цифровые трехкомпонентные акселерометры с невысоким уровнем шумов [1], которые можно непосредственно подключить к шине микрокомпьютера [2].

В данном исследовании проведена оценка возможности проведения долговременных измерений с помощью устройства на основе цифрового МЭМС акселерометра ADXL355, оценка адекватности его работы на основе анализа данных измерений вибрационного фона пролетной конструкции реального сооружения, расположенного вблизи трамвайных путей [3]. В результате экспериментов также получены распределения максимальных амплитуд виброускорений конструкции от температуры окружающей среды и проведены оценки изменения наклона конструкции в месте крепления датчика.

### Литература

- [1] Ye Z., Wei Y., Yang B., Wang L. Performance Testing of Micro-Electromechanical Acceleration Sensors for Pavement Vibration Monitoring // *Micromachines*. – 2023. – Vol. 14, No 1. – 153.
- [2] Peng Z., Li J., Hao H. Development and experimental verification of an IoT sensing system for drive-by bridge health monitoring // *Engineering Structures*. – 2023. – Vol. 293. – 116705.
- [3] Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В. Анализ эволюции фоновых вибрационных воздействий на конструкции здания // *Известия Вузов. Строительство*. – 2024. – №8. – С. 103–112.1

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В УПРУГО-ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ЛЕГКИЕ ЧЕЛОВЕКА

Цинкер М.Ю.<sup>1,2</sup>, Трусов П.В.<sup>1,2</sup>, Нурисламов В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

<sup>2</sup>Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровьем населения, Пермь

[cinker@fcrisk.ru](mailto:cinker@fcrisk.ru), [tpv@matmod.pstu.ac.ru](mailto:tpv@matmod.pstu.ac.ru), [maixrock3@gmail.com](mailto:maixrock3@gmail.com)

В рамках создания комплексной математической модели дыхательной системы человека предлагаемая работа посвящена вопросам, связанным с исследованием течения воздуха в легких человека. Легкие человека, образованные мелкими дыхательными путями и альвеолами, с содержащимся в них воздухом моделируются сплошной упруго-деформируемой двухфазной насыщенной пористой средой, заключенной во внутреннюю камеру с изменяющимся объемом (подвижными стенками). Первая фаза представляет собой деформируемый каркас (легочная ткань), вторая – газ, заполняющий поровое пространство. Решается совместная задача упругого деформирования сплошной насыщенной пористой среды легких, испытывающих большие градиенты перемещений, и фильтрации воздуха через деформируемую пористую среду (за счет перепада давления). Структура модели, ее основные уравнения и разрешающие соотношения приведены в [1], алгоритм реализации и анализ результатов применения модели – в [2]. В силу нелинейности задачи ее решение осуществляется с применением пошаговой (по времени) процедуры. В разработанном алгоритме на каждом временном шаге последовательно решаются подзадача деформирования двухфазной среды (с помощью метода конечных элементов) и относительного течения воздуха в пористой среде (с использованием метода конечных объемов). Для реализации алгоритма разработан комплекс программ (на языке C++). В результате численного решения связанной задачи течения воздуха в упруго-деформируемой пористой среде легких с использованием разработанного алгоритма получено пространственное распределение параметров легочной ткани и воздушной фазы в разные моменты дыхательного цикла, в том числе – поля перемещений, скоростей перемещений, деформаций, напряжений, потоков воздуха [2]. Дальнейшее изучение процессов дыхания предполагает развитие моделирования в направлении совместного рассмотрения течения воздушной смеси реального состава в воздухоносных путях и деформируемых легких человека, исследования пространственного распространения и оседания частиц в легких человека, возникновения патологических нарушений дыхательной системы, обусловленных негативным воздействием факторов среды обитания [3].

### Литература

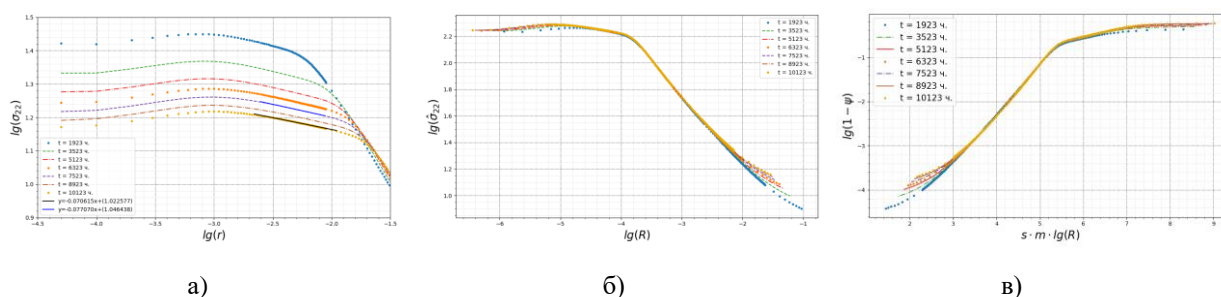
- [1] Трусов П.В., Зайцева Н.В., Цинкер М.Ю., Нурисламов В.В. Моделирование течения воздуха в упруго-деформируемой пористой среде, аппроксимирующей легкие человека: структура модели, ее основные уравнения и разрешающие соотношения // Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. – т. 17, № 2. – с. 219-231.
- [2] Трусов П.В., Зайцева Н.В., Цинкер М.Ю., Нурисламов В.В. Моделирование течения воздуха в упруго-деформируемой пористой среде, аппроксимирующей легкие человека: алгоритм реализации и анализ результатов применения модели // Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. т. 17, № 3. с. 329-346.
- [3] Трусов П.В., Цинкер М.Ю., Зайцева Н.В., Нурисламов В.В., Свинцова П.Д., Кучуков А.И. Оценка пространственного распределения зон локализации риска развития бронхолегочной патологии на основе математического моделирования воздушно-пылевых потоков в дыхательных путях и легких человека // Анализ риска здоровью. – 2024. – № 2. с. 141-152.

## АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ. КОНЕЧНО- ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Чаплий Д.В.<sup>1</sup>, Степанова Л.В.<sup>1</sup>, Белова О.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара  
[chapliy.dv@ssau.ru](mailto:chapliy.dv@ssau.ru), [stepanova.lv@ssau.ru](mailto:stepanova.lv@ssau.ru), [belova.on@ssau.ru](mailto:belova.on@ssau.ru)

Работа посвящена установлению свойства автомодельности решения задачи о накоплении повреждений вблизи вершины трещины в условиях ползучести. Проведено численное моделирование деформирования пластины с центральным дефектом с целью определения полей напряжений, деформаций и сплошности и установления автомодельности полученных решений. Рассматривается задача нормального нагружения пластины с центральной трещиной в условиях ползучести в среде с поврежденностью [1, 2]. В расчетную схему конечно-элементного комплекса с помощью пользовательской процедуры UMAT (User Material) введены определяющие соотношения теории ползучести для среды с поврежденностью, предложенные Л.М. Качановым и Ю.Н. Работновым. В ходе серии расчетов деформирования различных материалов построены радиальные зависимости напряжения  $\sigma_{22}$  и поврежденности  $(1-\psi)$  (где  $\psi$  – сплошность) от радиальной координаты  $r$  и от автомодельной переменной  $R$ . Зависимости компоненты тензора напряжений  $\sigma_{22}$  и поврежденности в условиях ползучести для показателя ползучести  $n=4$  в двойных логарифмических координатах приведены на рис. 1. Из рис. 1 а) видно, что в области, где развита ползучесть, имеется асимптотика по радиальной координате. На рис. 1 б) и в) продемонстрирована автомодельность компоненты тензора напряжений  $\sigma_{22}$  и поврежденности соответственно.



**Рис. 1.** Радиальные зависимости а)  $\sigma_{22}$  от радиальной координаты  $r$  в зоне ползучести для различных времен с кривыми, показывающими асимптотику в два момента времени, б)  $\sigma_{22}(r, \varphi=0)$  от автомодельной координаты  $R$ , в) параметра поврежденности  $(1-\psi)$  от автомодельной радиальной координаты  $R$

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 25-21-00272).

### Литература

- [1] Чаплий Д.В., Белова О.Н., Степанова Л.В., Быкова Ю.С. Исследование асимптотики поля напряжений в окрестности вершины трещины в условиях ползучести с учетом поврежденности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика – 2024. – № 3. – с. 17-38  
 [2] Chapliy D.V., Stepanova L.V., Belova O.N. Parametric analysis of the stress-strain and continuity fields at the crack tip under creep regime taking into account the processes of damage accumulation using UMAT // Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, Seriya Fizika-Matematicheskie Nauki. – 2025. – т. 27, № 3. – с. 509-529.

## НАМАГНИЧЕННОСТЬ ФРАКТАЛОПОДОБНЫХ АГРЕГАТОВ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ: ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ

Чемезова Е.А.<sup>1</sup>, Соловьева А.Ю.<sup>1</sup>, Елфимова Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург

[Chemezova.Ekaterina@urfu.ru](mailto:Chemezova.Ekaterina@urfu.ru), [Anna.Soloveva@urfu.ru](mailto:Anna.Soloveva@urfu.ru), [Ekaterina.Elifimova@urfu.ru](mailto:Ekaterina.Elifimova@urfu.ru)

Магнитные наночастицы являются перспективным инструментом для широкого спектра биомедицинских применений. Они используются в таких областях, как магнитная гипертермия, тканевая инженерия, адресная доставка лекарств, а также в роли контрастных веществ для визуализации биологических клеток. Магнитные наночастицы, попадая в клетки, могут образовывать внутри них агрегаты, в том числе и фракталоподобной структуры [1]. Разная структура этих агрегатов влияет на их реакцию в приложенном магнитном поле. Прогнозирование этих реакций важно для совершенствования технологий, использующих агрегаты феррочастиц в качестве магнитоактивных агентов.

В этой работе мы изучили магнитный отклик нескольких серий фракталоподобных кластеров с заданными структурными характеристиками (количество суперпарамагнитных наночастиц  $N$  и фрактальная размерность кластера  $df$ ). Рассматривались следующие серии фракталоподобных кластеров: 1)  $N=32$ ,  $df=1.5$ ; 2)  $N=32$ ,  $df=1.8$ ; 3)  $N=32$ ,  $df=2.2$ . В каждой серии образцов было смоделировано по 20 кластеров. Серии с параметрами 1) и 2) строились с использованием двух различных алгоритмов: один формировал вытянутые кластеры, ориентированные в одном направлении, а другой — компактные кластеры сферической формы.

После присвоения каждой наночастице единичного вектора магнитного момента было произведено моделирование намагниченности кластеров с помощью метода Монте-Карло. Намагниченность кластера определялась как сумма магнитных моментов. Предполагалось, что под воздействием магнитного поля магнитный момент свободно вращался внутри тела гранулы по механизму Нееля, и все наночастицы в кластере взаимодействовали друг с другом.

В результате работы были выявлены закономерности относительно влияния фрактальной размерности кластеров и алгоритма сборки фракталоподобных кластеров на намагниченность. Также было произведено сравнение с намагниченностью кубической решетки, которая содержала то же количество суперпарамагнитных наночастиц.

Авторы выражают благодарность за финансирование исследований Российским научным фондом (грант № 24-72-00115).

### Литература

[1] Blanco-Andujar C., Ortega D., Southern P., Pankhurst Q. A., Thanh N. T. K., High performance multi-core iron oxide nanoparticles for magnetic hyperthermia: microwave synthesis, and the role of core-to-core interactions //Nanoscale 7 – 2015 – с. 1768-1775.



## КОНВЕКЦИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТЕПЛОвого ПОЛЯ

Черепанов И.Н.<sup>1</sup>, Смородин Б.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный университет, Пермь  
*che-etai@yandex.ru*, *bsmorodin@yandex.ru*

Исследована неустойчивость и проведен анализ нелинейных конвективных течений в заполненной бинарной смесью (спирт-вода, при отрицательном коэффициенте термодиффузии) вертикальной ячейке Хеле-Шоу под влиянием модуляции температуры. Проанализировано два вида гармонической модуляции разности температур на узких горизонтальных границах ячейки Хеле-Шоу с относительной амплитудой  $a$  и безразмерной частотой  $\Omega$ : 1) модуляция температур на границах в противофазе; 2) температура верхней границы постоянна, а температура нижней меняется около среднего значения. В этих случаях свойства симметрии относительно середины высоты слоя для тепловой и концентрационной волн в покоящейся жидкости разные. В случае 1) распределения температуры и концентрации – четные функции относительно середины высоты; в случае 2) распределения не обладают определенной четностью.

Как и в случае модуляции силы тяжести [1] неустойчивость связана с квазипериодическими возмущениями. В ходе эволюции рождается бегущая волна (TW). Интегральные характеристики возникающих течений (число Нусельта и параметр смешивания), а также бифуркационная диаграмма решений зависят от вида модуляции (рис. 1,  $a=1$ ). Отличия таковы: порог колебательной конвекции и формирования бегущей волны в случае модуляции снизу  $R_{C1} = 0.42$  немного меньше, чем в случае модуляции в противофазе  $R_{C1} = 0.45$ . Потеря устойчивости развитой бегущей волны и переход к состоянию покоя (бифуркация типа седло-узел) при уменьшении числа Релея в подкритическую область имеет место в точке  $Ra_5^{TW} = 0.44$  (стрелка вниз на рис. 1). Спектр бегущей волны в точке  $R^W$  (рис. 2), имеет частоту бегущей волны  $\omega_{TW}$  и ее комбинации с внешней частотой  $\Omega \pm \omega_{TW}$ . При модуляции снизу TW устойчива в широком интервале чисел Релея  $R$ , при модуляции в противофазе TW разрушается и формируется стоячая волна (SW), интенсивность конвекции в которой ниже чем в TW.

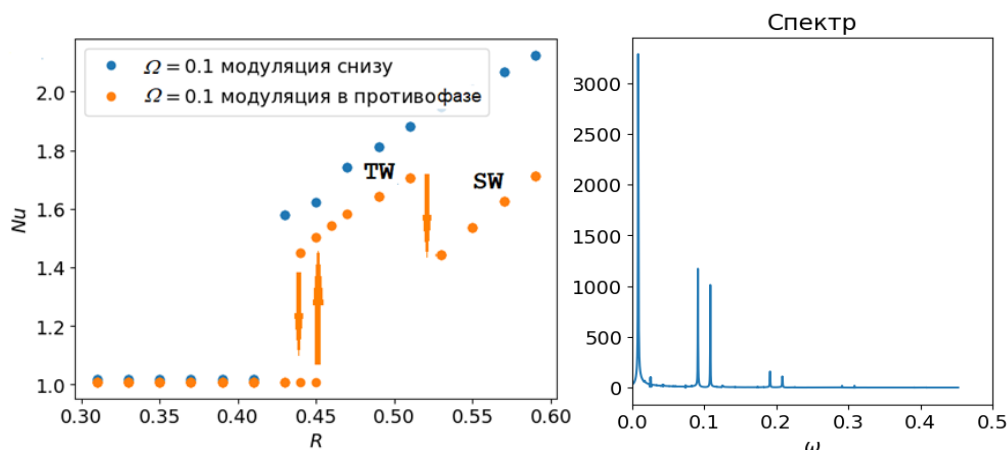


Рис. 1

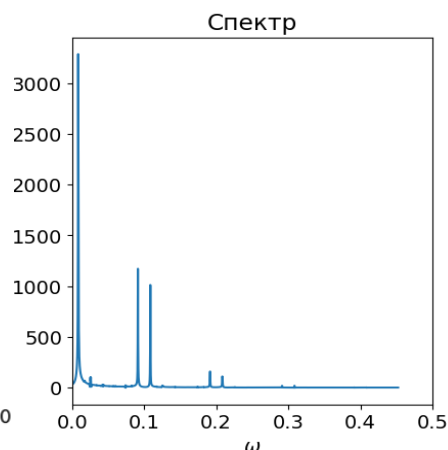


Рис. 2

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00344.

### Литература

[1] Myznikova B.I., Smorodin B.L., Convective stability of a horizontal binary-mixture layer in a modulated external force field// Fluid Dynamics. – 2001. – V. 36, № 1. – С. 1-10.

## ИЗГИБ МАГНИТНОГО ЭЛАСТОМЕРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Чириков Д.Н.<sup>1</sup>, Зубарев А.Ю.<sup>1</sup> Степанов Г.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург

<sup>2</sup>Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии  
элементоорганических соединений, Москва  
*d.n.chirikov@urfu.ru, a.j.zubarev@urfu.ru, gstepanov@main.ru*

В докладе сообщается об экспериментальных и теоретических исследованиях изгибных деформаций магнитных эластомеров под действием внешнего магнитного поля. Эксперименты проводились в ГНЦ «ГНИИХТЭОС», Москва. Были изготовлены два вида образцов на основе силиконового эластомера, содержащие микронные частицы карбонильного железа (средний диаметр 5 мкм) с объемной концентрацией 30%. Модули Юнга эластомеров были 0.5 Мпа, и 1.4 Мпа. Цилиндрические образцы диаметром 4.5 мм и длиной 36 мм помещались на горизонтальной подложке. Один конец образца был закреплен, другой – свободен. Выше и ниже образцов располагались соосные цилиндрические электромагниты, создающие вертикально направленное магнитное поле. Диаметр полюсов магнитов составлял 100 мм. Эксперименты показали, что если магнитное поле вблизи подложки меньше некоторого критического значения (равного 187 и 212 мТл для эластомеров с модулями упругости 0.5 Мпа, и 1.4 Мпа соответственно), то образцы на подложке оставались не деформированными. Если поле превосходило эти пороговые значения, образцы скачком изгибались вверх практически до максимально возможной степени изгиба. При уменьшении поля наблюдалось постепенное уменьшение степени изгиба и образцы принимали горизонтальную форму при 32 и 50 мТл соответственно. Таким образом, наблюдался пороговый характер деформации и широкий гистерезис зависимости изгиба образца от магнитного поля.

Для объяснения этих результатов предложена модель, основанная на записи свободной энергии длинного намагничивающегося цилиндра в виде функционала от его вертикальной деформации как функции от горизонтальной координаты. Реальная деформация соответствует минимуму функционала свободной энергии. Минимизация энергии приводит к нелинейному дифференциальному уравнению четвертой степени относительно деформации и граничным условиям на свободном конце цилиндра. Это уравнение было решено численно.

Анализ показал, что в полностью однородном поле гравитация препятствует спонтанному изгибу образца. Этот изгиб может иметь место только если поле увеличивается в направлении вверх и пондеромоторные силы, действующие на элементы образца, превосходят гравитационные силы. В результате изогнутое состояние соответствует минимуму определенной потенциальной ямы. При уменьшении поля энергия «дна» этой ямы растет, но система не может ее покинуть вплоть до полей, при которых яма исчезает. При этих полях происходит исчезновение деформации эластомера. При плавном (пошаговом) увеличении магнитного поля имеет место монотонный изгиб эластомера с формой, напоминающей параболу. Если магнитное поле меняется скачком от нуля до некоторого послепорогового значения, то изгиб образца имеет форму немонотонной кривой с максимумом. Такие изгибы наблюдались в проведенных экспериментах.

Полученные теоретические результаты количественно соответствуют проведенным экспериментам.

## ГЕМОДИНАМИКА БИФУРКАЦИИ СОННОЙ АРТЕРИИ В НОРМЕ И ПРИ СТЕНОЗЕ

Чутков Д.С.<sup>1,2</sup>, Тихвинский Д.В.<sup>1,2</sup>, Дубовой А.В.<sup>3</sup>, Гоголев А.В.<sup>3</sup>, Паршин Д.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск,

<sup>2</sup> Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск,

<sup>3</sup> ФГБУ Федеральный центр нейрохирургии Минздрава России, Новосибирск  
[d.chutkov@g.nsu.ru](mailto:d.chutkov@g.nsu.ru)

Лидирующие позиции по причинам смерти и инвалидизации в развитых странах на протяжении последних десятилетий занимают болезни системы кровообращения [1]. Инсульт – это 11% от общего числа смертей в мире, кроме того, в пятерку входят такие нейро-дегенеративные болезни, как болезнь Альцгеймера и Паркинсона. Стеноз сонной артерии является основной причиной ишемического инсульта [2], и, по мнению многих специалистов, является важным рисковым фактором проявления нейро-дегенеративных заболеваний [3]. Степень стеноза сонной артерии определяется при помощи магнитно-резонансной ангиографии или ультразвукового исследования.

При большой степени поражения бифуркации сонной артерии требуется хирургическое лечение, которое может включать: удаление атеросклеротической бляшки через разрез (эндартерэктомия), расширение артерии с установкой устройства (стента), использование донорского сосуда для перенаправления течения крови, в обход пораженной артерии. Для выбора оптимальной техники лечения конкретного пациента необходимо понимать, как изменится кровоток по пораженным артериям после операции, и каков риск развития послеоперационных осложнений.

Цели данной работы: поиск оптимальных параметров течения в модели бифуркации общей сонной артерии, оптимизация техники выполнения эндартерэктомии, а в перспективе оценка влияния морфологии на послеоперационный исход.

Для достижения цели решаются две задачи: построение параметрической 2-D (плоской) модели бифуркации общей сонной артерии и анализ 3-D конфигураций пациентов со стенозом до и после операции, а также здоровых добровольцев. Планируется в качестве параметров 2-D модели использовать: диаметры общей (ОСА), внутренней (ВСА) и наружной (НСА) сонной артерии, углы, под которыми исходят ВСА и НСА из ОСА и другие. На основании данных морфологического и гемодинамического анализа планируется выявить факторы ответственные за успех операции и риски послеоперационных осложнений.

### Литература

- [1] The top 10 causes of death. // World Health Organization. - URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- [2] Парфенов В. А. Факторы риска и вторичная профилактика ишемического инсульта // Нервные болезни. – 2007. – №. 1. – С. 2-8.
- [3] Kadow, B., & Smaldone, M. (2019). Safety and delayed intervention rates of active surveillance for small renal masses in an elderly population. // *Annals Of Translational Medicine*, 7(Suppl 6), S182. doi:10.21037/atm.2019.07.68

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУДНЫХ СИЛИКОНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ

Шадрин В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

<sup>2</sup> *Пермский государственный университет, Пермь*

[shadrin@icmm.ru](mailto:shadrin@icmm.ru)

Увеличение молочных желез с помощью силиконовых имплантатов относится к одним из наиболее часто выполняемых эстетических операций. Показано, что со временем прочность и разрывные деформации маммопротезов падают по сравнению с новыми, неиспользованными имплантатами. Это объясняется временем и взаимодействием с организмом [1]. Целью исследования является изучение изменения прочности и деформативности оболочки имплантатов молочных желез, приводящих к их разрыву в зависимости от условий механического воздействия на них. Объектом исследования стали оболочки грудных протезов производства Eurosilicone, Mentor и Motiva. Проведены эксперименты на циклическое растяжение с нарастающей амплитудой. Показано, что после растяжения до заданной деформации и выдержки по времени в течение 15 минут происходит размягчение материала за счет вязкоупругого механизма силикона и накопления повреждений (эффект Маллинза). При разгрузке материала и при выдержке в нерастянутом состоянии 15 минут, он частично восстанавливает свою начальную структуру и свойства. При дальнейшем растяжении до большей деформации кривая растяжения вновь выходит на начальную кривую нерастянутого образца. Приведены графики начальных участков растяжения (до 200%) для оболочек имплантатов Mentor 8 лет использования в организме, Eurosilicone 8 лет и Motiva 2 года. Показано, что образцы имплантатов, использованных в течение нескольких лет, имеют сильное размягчение при деформациях 100–150%. Это показывает, что оболочки грудных имплантатов испытывают постоянные деформации в процессе их использования. Величина этих постоянных циклических деформаций индивидуальна для каждого пользователя. Размер этих деформаций зависит от объема имплантата, режима и привычек пользователя — ежедневная систематическая нагрузка на имплантант. Чем больше и чаще циклические нагрузки, тем больше накапливается микроповреждений. Накопление микроповреждений ослабляет прочностные характеристики имплантатов. Такие деформации значительно меньше предельных разрывных деформаций, но при этом накапливаются микроповреждения, которые уменьшают разрывные характеристики оболочек имплантатов и размягчают их. Такая систематическая деформация значительно меньше предельной разрывной деформации, поэтому ослабление механических свойств оболочек происходит медленно, и грудные имплантаты могут служить до 15–20 лет. Одноразовые циклические нагрузки почти не влияют на прочность имплантатов, но могут способствовать накоплению микроповреждений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А20-120022590044-7).

### Литература

[1] Brown T., Harvie F., Kluess D. Testing mechanical properties of silicone gel-filled breast implants and their degradation // *Aesth. Plast. Surg.* – 2024. – Vol. 48. – p. 3362–3369.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ КОАКСИАЛЬНЫМИ ЦИЛИНДРАМИ

Шакиров Н.В.<sup>1</sup>, Судаков А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред, Пермь  
[chakirov@icmm.ru](mailto:chakirov@icmm.ru), [sudakov@icmm.ru](mailto:sudakov@icmm.ru)

Течения в концентрических каналах, образованных двумя коаксиальными трубами, реализуются в различных технологических процессах и аппаратах промышленности. Яркими примерами движения неньютоновских жидкостей в каналах с кольцевой геометрией являются, например, процессы прокачки через затрубное пространство между скважиной и бурильной колонной и нанесение покрытий на изделия с цилиндрической формы. В [1,2] приводятся обзоры литературы и рассматриваются численные решения задач течения нелинейно вязких жидкостей в кольцевых каналах. Для случая ньютоновской жидкости в [3,4] получены аналитические зависимости скорости течения и расхода от градиента давления. В [5,6] анализируется течение степенной жидкости с индексом течения  $n$ . Отмечается, что аналитическое решение задачи течения жидкости со степенным реологическим уравнением в кольцевом канале возможно для случая, когда его обратная величина целое число.

В настоящей работе рассматривается задача о движении несжимаемых неньютоновских жидкостей между двумя горизонтальными коаксиальными цилиндрами под воздействием постоянного градиента давления. Исследуется течение жидкостей, которые характеризуются реологическими моделями Рейнера, полиномиальной и дилатантой.

Предложены аналитические зависимости для расчета расхода. Отмечается, что в отличие от степенной жидкости, для которой положение поверхности с нулевым значением напряжения сдвига определяется только индексом течения, в случае сложных жидкостей эта поверхность также зависит величины градиента давления.

### Литература

- [1] Лысакова Е.И. Влияние добавок наночастиц на течения буровых растворов: диссертация к.ф.-м.н.: 1.1.9 -Красноярск -2022.-148 с.
- [2] Козицына М.В. Стратифицированное пространственное течение аномально-вязких жидкостей в каналах формирующего инструмента при соэкструзии: диссертация к.т.н.:01.02.05- Пермь.2019.-108 с.
- [3] Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. – М.: Госиздат, 1951 – 520 с.
- [4] Слёзкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. - М.: Госиздат, 1955- 520 с.
- [5] Fredricson A.G., Bird R.B. Non-Newtonian flow in annuli // Ind.Eng.Chem. -1958.-V.50, № 3. - P.347-352.
- [6] Бостанджинян С.А.. Боярченко В. И. Гидродинамический анализ течения жидкости со степенным реологическим уравнением в цилиндрическом канале винта экструдера // Механика полимеров. - 1968. -№6.- С.1094-1102.
- [7] Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей. - М.: Энергия, 1975 – 352 с.
- [8] Tiu C., Bhattacharyya S.Developing and fully developed velocity profiles for inelastic power law fluids in an annulus // AIChE Journal. -1974.- V.20, № 6. –P.1140-1144.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИН В КОСТНОЙ ТКАНИ И СКАФФОЛДАХ СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА XFEM

Шалимов А.С.<sup>1</sup>, Ташкинов М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*  
[Shalimov96@pstu.ru](mailto:Shalimov96@pstu.ru), [M.Tashkinov@pstu.ru](mailto:M.Tashkinov@pstu.ru)

В современной биомедицине актуальным является направление исследования искусственных имплантов, которые могут быть спроектированными таким образом, чтобы подходить для замены поврежденной костной ткани. Они должны иметь такую структуру, чтобы выдерживать внутренние и внешние физиологические нагрузки. Такие конструкции называют скаффолдами, и их применение заключается в том, чтобы заменить прочностные и структурные функции реальной кости. Скаффолды должны быть биосовместимыми и биодеградируемыми, чтобы быть принятыми организмом и постепенно замещаться здоровой тканью. Исследование механического поведения при разрушения костной ткани и скаффолдов необходимо для разработки требований к механическим характеристикам костных имплантов.

В данной работе были изучены элементарные объемы трабекулярной кости и скаффолдов для ее замещения. Без учета мягких тканей трабекулярную кость можно описать как случайную двунепрерывную пористую структуру открытого типа, в котором твердая фаза представляет собой взаимосвязанную сеть твердых пластин и связок, называемых лигаментами. Для замены трабекулярной кости можно использовать скаффолды как с периодической, так и со случайной структурой, так как микроструктура кости является стохастической по своей природе и в разных местах морфология будет разной.

Рассматривается механическое поведение при разрушении представительных объемов трабекулярной кости и скаффолдов при приложенных механических нагрузках с использованием модели роста трещин с помощью расширенного метода конечных элементов (XFEM) в сочетании с техникой виртуального закрытия трещины (VCCT). Геометрия исследуемых костных структур была получена с помощью сканов реальных костей путем компьютерной микротомографии, а геометрия исследуемых случайных структур скаффолдов была получена с помощью аналитического метода определения межфазной поверхности двухфазного элементарного объема. Геометрические модели подбирались таким образом, чтобы морфологические параметры (например, объемная доля и средняя толщина лигаментов) трабекулярной структуры и структуры скаффолдов были сопоставимы.

Поведение при разрушении представительных объемов трабекулярных костей и скаффолдов смоделировано с применением подходов линейно-упругой механики разрушения, реализованного в прикладном пакете SIMULIA Abaqus. Исследовано влияние микроструктурной морфологии на напряженно-деформированное состояние и процессы разрушения в элементарных объемах при различных комбинациях геометрических моделей. Проведено сравнение эволюции разрушения в представительных объемах трабекулярной кости и скаффолдов.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2025-0001).

## **ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО АКТУАТОРА ДЛЯ ЗАДАЧ ВИБРОДИАГНОСТИКИ**

Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

*shardakov@icmm.ru, shap@icmm.ru, glot@icmm.ru*

Активная вибродиагностика является перспективным методом оценки механического состояния крупномасштабных конструкций. Одним из основных элементов вибродиагностической системы является актуатор. С его помощью возбуждаются диагностические сигналы в конструкции. Ранее авторами разработан актуатор на основе пьезокерамики [1] и показана его эффективность по сравнению с другими вариантами пьезокерамических актуаторов [2].

Для крупномасштабных конструкций следует использовать диагностические сигналы высокой амплитуды. Создание таких сигналов требует задания в пьезокерамике высокого уровня напряженности электрического поля. Из литературы известно, что пьезокерамика при высоких значениях напряженности поля проявляет нелинейные свойства [3]. Как правило, динамическое деформирование пьезокерамики описывается линейными соотношениями. Параметры этих соотношений известны, они приводятся в паспортных данных для конкретного типа пьезокерамики. Нелинейные модели пьезокерамики менее популярны и практически не обеспечены параметрами. Поэтому необходимо определить границы применимости линейной модели актуатора.

В рамках этой работы проведена серия экспериментов с ранее разработанным актуатором. Согласно которым, пьезокерамика нагружалась электрическими импульсами различной амплитуды и длительности. На основе этих экспериментов сделаны следующие выводы.

Линейная модель пьезокерамики может применяться при низких уровнях напряженности электрического поля. Если допустимую погрешность линейной модели принять равной 10%, то максимальная амплитуда электрического сигнала не должна превышать 45 В/мм.

Описание процесса динамического деформирования пьезокерамики при высоких уровнях напряженности электрического поля должно учитывать скорость изменения электрического поля и нелинейный процесс вторичной поляризации пьезокерамики, который вносит основной вклад в петлю гистерезиса.

Нелинейное поведение пьезокерамики в стесненных условиях отличается от поведения свободной пьезокерамики. Поэтому построение модели актуатора следует проводить, опираясь на эксперименты с актуатором в сборе.

### Литература

- [1] Shardakov I., Shestakov A., Glot I., Gusev G., Epin V., Tsvetkov R. Piezoceramics Actuator with Attached Mass for Active Vibration Diagnostics of Reinforced Concrete Structures //Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 7. – P. 2181.
- [2] Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О., Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В. Сравнение динамических характеристик пьезокерамических актуаторов, применяемых в вибродиагностике крупномасштабных конструкций //Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. – Т. 17, №3. – С. 376-386.
- [3] Hall D.A. Review nonlinearity in piezoelectric ceramics //Journal of materials science. – 2001. – Т. 36. – С. 4575-4601.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО СТЕКЛА ОТ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

Шарифулин В.А.<sup>1,2</sup>, Любимова Т.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[vadsharif@bk.ru](mailto:vadsharif@bk.ru)

На основе анализа существующих экспериментальных данных [1] показано, что степенной закон Гебхарта-Моллендорфа [2] зависимости плотности  $\rho$  от температуры  $T$  для воды  $\Delta\rho \propto \Delta T^\gamma$  применим к некоторым сплавам стеклообразующих систем, демонстрирующих фазовый переход жидкость-жидкость от хрупкой к прочной. Это существенно расширяет диапазон значений показателя степени  $\gamma$  за пределы свойственного воде интервала от 1 до 2. Для значений числа Прандтля  $Pr$  от 0,1 до  $10^5$  и показателя степени до пяти в приближении пограничного слоя исследованы автомодельные факельные течения от линейного источника тепла [3]. Для этого к рассматриваемой задаче адаптирован метод численного продолжения точных решений [4]. Высокая степень сходимости метода достигнута за счет использования в качестве параметра продолжения нового критерия подобия (числа подобия Прандтля  $Pr_s$ ), объединяющего число Прандтля  $Pr$  со степенным  $\gamma$  показателем соотношения Гебхарта-Моллендорфа. Классифицированы структуры режимов течения. С увеличением числа Прандтля профили вертикальной скорости стремятся к форме распределения Лапласа. Наибольшее отклонение от распределения Лапласа наблюдается при  $(4 + \gamma)/9\gamma < Pr < \sqrt{2(4 + \gamma)} / 3\gamma$ . С ростом показателя степени  $\gamma$  экстремум смещается в сторону меньших чисел Прандтля. Обнаружена область, где профиль вертикальной скорости в логарифмическом масштабе приобретает точку перегиба, до нее скорость убывает быстрее распределения Лапласа, а после медленнее. Максимум отношения локального потока импульса к произведению локального расхода и локальной максимальной вертикальной скорости достигается при  $Pr = \sqrt{2(4 + \gamma)} / 3\gamma$ .

### Литература

- [1] Tsuchiya Y. Thermodynamics of the structural changes in the liquid Ge–Te system around the Te-rich eutectic composition // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2002. – V. 312. – P. 212-216.  
[2] Gebhart B., Mollendorf J. C. A new density relation for pure and saline water // Deep Sea Research. – 1977. – V. 24. – №. 9. – P. 831-848.  
[3] Mollendorf J. C., Johnson R. S., Gebhart B. Several plume flows in pure and saline water at its density extremum // Journal of Fluid Mechanics. – 1981. – V. 113. – P. 269-282.  
[4] Ascher U. M., Mattheij R. M. M., Russell R. D. Numerical solution of boundary value problems for ordinary differential equations. – Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995.



## УПРАВЛЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ РЕЖИМАМИ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ ДВИЖЕНИЕМ КРЫШКИ

Шарифулин В.А.<sup>1,2</sup>, Белобородов Ф.С.<sup>2</sup>, Шарифулин А.Н.<sup>2</sup>, Любимова Т.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[vadsharif@bk.ru](mailto:vadsharif@bk.ru)

Конвективная устойчивость воздуха в подогреваемой снизу квадратной полости с боковыми твердыми теплоизолированными стенками, хорошо исследована как теоретически, так и экспериментально. Известно, что состояние механического равновесия, при превышении критического значения число Релея, равного 2585 [1] мягким образом сменяется одним из двух надкритических крупномасштабных валовых стационарных течений. Эти два валовых течения отличаются друг от друга лишь направлением циркуляции. Как в эксперименте, так и в расчетах для выбора того или иного течения задают малое возмущение позволяющее выбрать одно из этих двух течений. С ростом интенсивности нагрева выбранное с помощью указанной процедуры течение развивается, становится колебательным и турбулизируется.

В приложениях возникает потребность разовой или периодической смены циркуляции развитого одновихревого валового течения. Нами показано, что менять направление конвективного течения можно с помощью управляемого движения крышки полости. Хотя изотермическая задача о течении вязкой несжимаемой жидкости в квадратной полости с движущейся с постоянной скоростью крышкой хорошо изучена [2], рассматриваемое ее обобщение, предложенное в [3] исследовано недостаточно. Плаучность, вызванная неизотермичностью, может играть значительную роль в технических и природных приложениях.

В настоящей работе влияние плавного циклического изменения скорости верхней стенки на конвективную устойчивость воздуха в квадратной полости исследовано аналитически в маломодовом приближении и численно методом конечных разностей. Все стенки полости твердые, боковые стенки идеально теплоизолированные, а верхняя и нижняя — изотермические, причем нижняя стенка более горячая. Расчеты, выполненные для чисел Грасгофа, до тридцати раз превышающих критическое значение, показали, что для каждого надкритического числа Грасгофа существует такое критическое число Рейнольдса, что при изменении числа Рейнольдса в определенном диапазоне, не превышая этого значения, течение плавно переходит от нормального одновихревого к аномальному двухвихревому состоянию и наоборот. Однако если число Рейнольдса выходит за пределы этого интервала, происходит жесткий и необратимый переход от аномального течения к нормальному. Понимание структуры течения и механизмов, лежащих в основе этих различных режимов, может помочь улучшить модели горения [4].

### Литература

- [1] Mizushima, J. Onset of the Thermal Convection in a Finite Two-Dimension Box // J. Physical Society of Japan. – 1995. – V. 64, № 7. – P. 2420-2432.
- [2] Marchi C. H., Suero R., Araki L. K. The lid-driven square cavity flow: numerical solution with a 1024 x 1024 grid // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2009. V. 31. P. 186-198.
- [3] Тарунин Е. Л. Ветвление решений уравнений конвекции в замкнутой полости с подвижной границей при подогреве снизу // Современные проблемы тепловой гравитационной конвекции. Минск. 1974. С. 51-58.
- [4] Wu C. et al. Horizontal flame spread over thin solids in reduced buoyancy environments // Combustion and Flame. – 2022. – V. 240. – P. 112008.

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАСКАДНЫХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Шестаков А.В.<sup>1,2</sup>, Фрик П.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
[shestakov@icmm.ru](mailto:shestakov@icmm.ru), [frick@icmm.ru](mailto:frick@icmm.ru)

Согласно гипотезе А. Н. Колмогорова [1], величиной, определяющей динамику турбулентности (статистические свойства) в инерционном интервале, является скорость диссипации энергии  $\varepsilon$  которая, равна скорости спектрального переноса энергии вдоль инерционного интервала. Для структурных функций поля скорости эти гипотезы и соображения размерности дают степенные законы вида  $S_q(l) = \langle \delta v_l^q \rangle \sim \langle \varepsilon l \rangle^{q/3}$ . Здесь  $\delta v_l$  - разность какой-либо компоненты скорости в двух точках, отстоящих на расстоянии  $l$  друг от друга,  $q$  целое число, определяющее порядок структурной функции. Однако, скорость диссипации энергии  $\varepsilon$ , как и спектральный поток энергии  $\pi$ , есть величина случайная (на что указал Л.Ландау в 1942 г.), а это означает, что при вычислении структурных функций поля скорости необходимо знать моменты скорости диссипации энергии  $\langle \varepsilon^{q/3} \rangle$ . Эта проблема сводится к поиску функции распределения вероятности для скорости диссипации энергии. Попытка решить эту проблему была предпринята в работе А. Н. Колмогорова [2], где он предположил логнормальное распределение, и в работах [3,4], где было предложено логпуассоновское распределение. Тем не менее, вопрос о функции распределения остается открытым до сих пор.

В данной работе изучаются статистические свойства скорости диссипации  $\varepsilon$  и спектрального потока энергии  $\pi$  с помощью каскадных моделей. При этом используются 4 модели турбулентности, описанные, например, в обзоре [5]: GOY, SABRA, модель Меландера (формула 256 обзора [5]), и модель спиральной турбулентности, полученная авторами (формула 258 обзора [5]). В каскадных моделях предполагается зависимость структурных функций пульсаций скорости от масштаба  $S_q = \langle |U_n|^q \rangle \sim k_n^{\zeta_q}$ . Проводится численное моделирование и сравнительный анализ статистических свойств турбулентности в рамках этих моделей с использованием степенных показателей структурных функций поля скорости и сравнение функций распределений вероятности для скорости диссипации энергии  $\varepsilon$  и спектрального потока  $\pi$ .

В результате проведенных численных расчетов получены значения степенных показателей структурных функций  $\zeta_q$  для разных моделей турбулентности. Построены функции распределения для скорости диссипации энергии и спектрального потока в разных моделях. Проведен сравнительный анализ полученных результатов между собой и с результатами других авторов, в частности [2,3]. Показано, что функция распределения вероятности для скорости диссипации энергии очень близка к логпуассоновской.

### Литература

- [1] Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Доклады АН СССР. – 1941. – Т.30. – С. 9 – 13.
- [2] Kolmogorov A. N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at High Reynolds number // J. Fluid Mech. – 1962. – V. 13. – P. 82 – 85.
- [3] She Z. S., Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence // Physical Review Letters. – 1994. – V. 72. – P. 336 – 339.
- [4] Dubrulle B. Intermittency in fully developed turbulence: log-Poisson statistics and generalized scale covariance // Physical Review Letters. – 1994. – V.73. – P. 959 – 962.
- [5] Plunian F., Stepanov R., Frick P. Shell models of magnetohydrodynamic turbulence // Physics Reports. – 2013. – V.523. – N.1. – P.1 – 60.

## ВЫСШИЕ АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТИН

Шешенин С.В.<sup>1</sup>, Кузьмин М.А.<sup>1</sup>, Артамонова Н.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет, Москва  
[sergey.sheshenin@mail.ru](mailto:sergey.sheshenin@mail.ru)

Работа является непосредственным продолжением работы [1]. Развивается теория осреднения неоднородных по толщине пластин. Одним из методов редукции к двумерным уравнениям является асимптотический метод, который используется в нашем исследовании. Впервые асимптотический ряд был предложен в [2]. Асимптотика строится относительно малого параметра, равного отношению толщины к характерному размеру в плане пластины. Некоторые работы в этом направлении приведены в списке литературы [3–8]. В работах [5–8] асимптотическая теория в трех приближениях была развита для слоистых пластин и для периодических в плане гофрированных пластин. Описываемая ниже теория также применима к пластинам из функционально-градиентного материала (ФГМ).

Особенностью работы является рассмотрение четвертого и пятого приближений. Показано, что для четвертого приближения и выше состояние изгиба и деформирования в срединной плоскости не разделяются даже для однородной пластины. Проведенное асимптотическое исследование справедливо и для сильно ортотропных пластин. Показано, что при поперечном изгибе симметричной или даже однородной пластины возникают перемещения в плоскости пластины. Связь приводит к малой несимметрии поперечного напряжения сдвига вдоль поперечного направления. Это подтверждается как асимптотическим приближением четвертого порядка, так и расчетами. Этот эффект обусловлен нагрузкой, приложенной к верхней поверхности пластины, а не к средней поверхности. Продольные перемещения имеют третий порядок относительно толщины. Доказано, что прогиб можно определить независимо от перемещений в плоскости. Поэтому все теории пластин третьего порядка, пренебрегающие перемещениями в срединной поверхности, асимптотически обоснованы.

Практическим результатом асимптотического исследования является уточнение поперечных напряжений сдвига, обеспечиваемое приближением четвертого порядка по сравнению с теорией второго порядка. Уточнение возможно применить, используя прогиб, найденный методом конечных элементов.

### Литература

- [1] Шешенин С.В., Кузьмин М.А., Артамонова Н.Б. Высшие асимптотические приближения в задаче о поперечном изгибе пластины // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2024. – т. 30, № 2. – с. 222-236.
- [2] Kohn R.V., Vogelius M. A new model of thin plates with rapidly varying thickness // Int. J. Solids Struct. – 1984. – vol. 20, no. 4. – p. 333-350.
- [3] Levinski T., Telega J.J. Plates, laminates and shells. – New York: World Scientific, 2000. – 768 с.
- [4] Панасенко Г.П., Резцов М.В. Осреднение трехмерной задачи теории упругости в неоднородной пластине // Докл. АН СССР. – 1987. – т. 294, № 5. – с. 1061-1065.
- [5] Шешенин С.В., Мурадханов Р.Р. Асимптотическое исследование изгиба пластины для сильно ортотропного материала // Известия РАН. МТТ. – 2023. – № 3. – с. 36-57.
- [6] Шешенин С.В. Асимптотический анализ периодических в плане пластин // Известия РАН. МТТ. – 2006. – № 6. – с. 71-79.
- [7] Шешенин С.В. Применение метода осреднения к пластинам, периодическим в плане // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2006. – № 1. – с. 47-51.
- [8] Шешенин С.В., Скопцов К.А. Теория пластин, основанная на методе асимптотических разложений // Математическое моделирование и численные методы. – 2014. – № 2. – с. 49-61.

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК НА ПОТОКИ В ПЛОСКИХ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ НАСОСАХ**

Шмаков Е.И.

*Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург*  
[shmakov.evgeny@urfu.ru](mailto:shmakov.evgeny@urfu.ru)

В настоящее время индукционные насосы находят широкое применение в различных промышленных сферах, начиная от ядерной энергетики, где они используются в системах охлаждения, и заканчивая металлургией, где они служат средством бесконтактной транспортировки металлов. Одной из наиболее распространенных конструкций индукционных насосов являются плоские линейные насосы. Они удобны в обслуживании, поскольку катушки индуктора легко заменяются, что особенно важно, учитывая их частый выход из строя. Специфика применения индукционных насосов предполагает использование достаточно больших немагнитных зазоров для обеспечения необходимой толщины теплоизоляции [1-2]. Высшие гармоники, имея меньшее полюсное деление по сравнению с основной бегущей волной, обладают меньшей глубиной проникновения, поэтому их влиянием часто пренебрегают при моделировании таких устройств. Однако нечетные высшие пространственные гармоники могут оказывать дополнительное воздействие на поток электропроводящей жидкости от ускоряющего до тормозящего.

В данной работе было проведено исследование двусторонних плоских линейных индукционных насосов в диапазоне электромагнитных чисел подобия, характерных для таких конструкций. Целью исследования было определить соотношение амплитуд высших пространственных гармоник к основной гармонике. В ходе исследования было обнаружено, что в существующих конструктивных параметрах высшие гармоники имеют достаточно значительную амплитуду, составляющую от 40 до 70%. Исследование также включало анализ влияния высших пространственных гармоник на поведение потока электропроводящей жидкости и определение значений электромагнитных критериев подобия, при которых вкладом гармоник можно пренебречь. Моделирование магнитогидродинамических течений проводилось с использованием метода конечных элементов для расчета распределения электромагнитного поля и метода конечных объемов для гидродинамических полей. Электромагнитное поле рассчитывалось с учетом вклада поля скоростей в гармонической постановке [3].

Особое внимание в исследовании уделялось влиянию высших гармоник на эффективность и надежность работы индукционных насосов. Анализ показал, что учет высших гармоник может значительно изменить характеристики потока жидкости и электромагнитного поля, что, в свою очередь, может повлиять на производительность и срок службы насосов.

В заключение, исследование подчеркивает важность учета высших гармоник при проектировании и эксплуатации индукционных насосов. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструктивных параметров индукционных насосов и повышения их надежности и эффективности.

### Литература

- [1] Круминь, Ю. К. Основы теории и расчета устройств с бегущим магнитным полем / Ю. К. Круминь – Рига: Зинатне, 1983. – 278 с.
- [2] Geza V., Nacke B. Numerical simulation of core-free design of a large electro-magnetic pump with double stator. *Magnetohydrodynamics*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 417-432.
- [3] Vencels J., Råback P., Geza V. EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics // *SoftwareX*. Elsevier B.V., 2019. Vol. 9. P. 68–72.

## КОНВЕКЦИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ С ЭФФЕКТОМ СОРЕ В НАКЛОННОМ ТРЁХСЛОЙНОМ ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ С РАЗНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ СЛОЁВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ

Шубенков И.С.<sup>1,2</sup>, Любимова Т.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

[ShubnikovIS@yandex.ru](mailto:ShubnikovIS@yandex.ru), [lyubimovat@mail.ru](mailto:lyubimovat@mail.ru)

В работе исследуются возникновение и нелинейные режимы конвекции бинарной жидкой смеси с учётом эффекта Соре в наклонном пористом пласте, состоящем из трёх слоёв разной проницаемости, под действием тяжести и строго вертикального градиента температуры. Проницаемости верхнего и нижнего слоёв считаются одинаковыми и всегда меньшими, чем проницаемость среднего слоя. Такая ситуация имитирует нефтеносные пласты в реальных залежах углеводородов. Рассматриваемая проблема важна для геологических приложений. В предыдущих работах [1,2] были исследованы возникновение и развитие тепловой конвекции однокомпонентной жидкости в наклонном пористом слое, насыщенном жидкостью, в поле тяжести, при строго вертикальном градиенте температуры.

В данной работе проводится исследование линейной устойчивости теплопроводного режима по отношению к трехмерным возмущениям. Задача решалась численно путём построения фундаментальной системы решений. Исследование показало, что:

- 1) При любом угле наклона слоя трехмерные возмущения более опасны, чем двумерные, а наиболее опасные возмущения имеют форму продольных валов.
- 2) Понижение проницаемости внешних слоёв относительно внутреннего слоя приводит к повышению устойчивости системы, фактически уменьшая толщину слоя, в котором происходят основные конвективные течения.
- 3) При переходе через определённое значение параметра трёхмерности, кривые на графике зависимости критического числа Рэлея от угла наклона слоя меняют характер наклона, что сопровождается скачком. Это связано с изменением локального минимума на нейтральных кривых и вызвано наличием примеси. При отсутствии примеси такое поведение системы не наблюдается.
- 4) Чем выше значение отношения разделения, тем выше устойчивость системы по отношению к плоским возмущениям при малых углах наклона слоя (вертикальный слой и малые отклонения от него). При приближении слоя к горизонтальному, значение отношения разделения оказывает не такое сильное, но всё ещё значительное влияние на устойчивость системы.

### Литература

- [1] Lyubimova T.P., Muratov I.D., Shubnikov I.S., Onset and non-linear regimes of convection in an inclined porous layer subjected to vertical temperature gradient. *Phys Fluids* 34: 094114 (2022).
- [2] Shubnikov I., Lyubimova T., Sadilov E., Three-dimensional convection in an inclined porous layer subjected to vertical temperature gradient. *Fluid Dynamics & Materials Processing* 20(9), 1957-1970 (2024).

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭРЗАЦ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ С СУБСТРУКТУРОЙ

Шутов А.В.<sup>1,2</sup>, Уфимцев К.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

[alexey.v.shutov@gmail.com](mailto:alexey.v.shutov@gmail.com), [kirill.ufimtzev@yandex.ru](mailto:kirill.ufimtzev@yandex.ru)

В докладе предложен новый тип суррогатных моделей, применяемых для описания механических систем, так называемые Эрзац Модели (ЭМ). В применении к моделированию механического поведения представительных объёмных элементов (ПОЭ) материалов в сочетании с многомасштабным методом конечных элементов (МКЭ<sup>2</sup>) [1,2], разработанный нами метод позволяет автоматически генерировать уточнённые определяющие соотношения.

Основное отличие ЭМ от уже существующих суррогатных моделей ПОЭ, основанных на прямых методах машинного обучения, заключается в том, что ЭМ представляют абстрактные механические устройства с обобщёнными внешними и внутренними степенями свободы [3]. Важным преимуществом ЭМ над прямыми подходами класса data-driven является то, что ЭМ естественным образом учитывают геометрические и физические нелинейности, при этом ЭМ соблюдают основные принципы механики определяющих соотношений, такие как баланс мощности, объективность при наложенном повороте, термодинамическая совместность [3]. Благодаря заложенной неаффинной кинематике и соблюдению общего принципа внутреннего равновесия, ЭМ могут точно аппроксимировать поведение широкого спектра механических систем. Кроме того, ЭМ содержат относительно небольшое количество свободных параметров, подлежащих калибровке. Поэтому определяющие соотношения на основе ЭМ калибруются на небольших экспериментальных выборках [3]. Благодаря редукции модели, ЭМ содержат существенно меньше степеней свободы по сравнению с исходной моделируемой системой ПОЭ [3], что существенно повышает вычислительную эффективность многомасштабного конечно-элементного моделирования (МКЭ<sup>2</sup>).

В докладе рассматриваются основные принципы построения ЭМ и представлен алгоритм их последовательного уточнения. Представлены три примера применения ЭМ. В первом примере ЭМ позволяют значительно ускорить моделирование вязкоупругого волокнистого композита. Во втором примере ЭМ приближают механический отклик ПОЭ пористого металлического материала. В третьем примере демонстрируется применимость ЭМ для построения общих феноменологических моделей с учётом геометрической и физической нелинейностей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, код проекта 23-19-00514.

### Литература

- [1] Smit R.J.M., Brekelmans W.A.M., Meijer H.E.H., Prediction of the mechanical behavior of nonlinear heterogeneous systems by multi-level finite element modeling //Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering – 1998. – т. 155, № 1-2. – с. 181–192.
- [2] Feyel F., Chaboche J.L., FE2 multiscale approach for modelling the elastoviscoplastic behaviour of long fibre SiC/Ti composite materials //Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering – 2000. – т. 183, № 3-4. – с. 309–330.
- [3] Shutov A., Ufimzev K., Computationally efficient ersatz models for mechanical structures and refined material modeling //SSRN 4826630.

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДИССИПАТИВНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЭЛЕКТРОВЯЗКОУПРУГИХ СИСТЕМ**

Юрлова Н.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[yurlova@icmm.ru](mailto:yurlova@icmm.ru)

Работа посвящена исследованию характера зависимости динамических характеристик электро-вязкоупругой системы, представляющей собой кусочно-однородное тело, состоящее из упругих, вязкоупругих, электроупругих (пьезоэлектрических) элементов, а также внешних пассивных электрических цепей, присоединенных к электродированным поверхностям пьезоэлементов, от параметров, определяющих ее геометрическую конфигурацию (размеры и расположение вязкоупругого и пьезоэлектрического элементов, формирующих систему, по отношению к конструкции и друг к другу).

В таких системах для демпфирования колебаний реализуются два механизма диссипации энергии: за счет внутреннего трения в вязкоупругих частях и за счет преобразования части энергии механических колебаний в электрическую с последующим ее рассеиванием в электрических цепях.

Исследование проводилось на основе численного решения задачи о собственных колебаниях для тонкостенной пространственной конструкции - полуцилиндрической оболочки. В качестве внешних электрических цепей рассмотрены резистивная ( $R$ ) и последовательная резонансная ( $RL$ ) цепи.

Рассмотрен ряд возможных геометрических конфигураций расположения вязкоупругих и пьезоэлектрических элементов. Найдены варианты компоновки конструкции, которые могут обеспечить наилучшие демпфирующие свойства в некотором диапазоне частот при реализации либо механизма внутреннего трения, либо механизма преобразования пьезоэлементом механической энергии колебаний в электрическую с последующим ее рассеиванием во внешних электрических цепях.

На основе серии вычислительных экспериментов получены результаты, демонстрирующие, как изменяются демпфирующие свойства системы при использовании как отдельно каждого из рассматриваемых механизмов диссипации энергии колебаний, так и совместно.

Сделаны количественные оценки изменения диссипативных свойств оболочки, демонстрирующие, в каких случаях оба механизма диссипации энергии приводят к повышению демпфирующих характеристик электро-вязкоупругих систем, а в каких – к их снижению.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 124020700047-3 «Комплексные исследования в задачах деформационного мониторинга, аэроупругости, интеллектуальных конструкций, термомеханики».

## ПОЛУЧЕНИЕ СЕЙСМОГРАММ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЗАПИСЕЙ КОЛЕБАНИЙ

Яваров А.В.<sup>1</sup>, Тяпкина П.А.<sup>1,2</sup>, Федосеев А.В.<sup>2</sup>, Лалин В.В.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов, Москва

[yavarov\\_av@spbstu.ru](mailto:yavarov_av@spbstu.ru), [polina.tyapkina@gmail.com](mailto:polina.tyapkina@gmail.com)

Сейсмический мониторинг состояния зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния буровзрывных работ, как правило, осуществляется без проведения прочностных расчетов [1]. Одной из причин этого является отсутствие утвержденной методики задания нагрузки от указанного специфического воздействия [2].

По сравнению с землетрясениями массовые взрывы характеризуются относительно малой продолжительностью действия [1, 3], и генерацией, в том числе, высокочастотных колебаний конструкций [1]. В связи с этим в дальней зоне взрывов (зоне упругих деформаций), в общем случае, должны удовлетворяться несколько условий. Амплитуда получаемого сигнала равняется нулю в начальный и конечный моменты времени, а колебания элементов конструкций происходят относительно положения равновесия [4].

Дополнительные проблемы корректного задания нагрузки от ведения буровзрывных работ создает присутствие шумовой компоненты в записях и отсутствие утвержденной методики ее подавления. Также при мониторинге в основном используются велосиметры и акселерометры, а для задания кинематического воздействия в программных комплексах (далее – ПК), как правило, конечно-элементных, для прямых динамических расчетов применяются сейсмограммы [5].

Совокупность описанных проблем приводит к тому, что стандартные модули для обработки записей землетрясений в ПК SCAD Office и ЛИРА 10 не позволяют получить корректные сейсмограммы из инструментальных акселерограмм [4]. Как следствие, прямой динамический метод расчета [4, 6, 7], реализованный в различных ПК, не находит должного применения при оценке воздействия от буровзрывных работ.

В докладе представлена апробация методики по обработке инструментальных записей колебаний от взрывных работ в разработанной авторами программе. Цель исследования состоит в получении корректных сейсмограмм, предназначенных для моделирования кинематического воздействия.

На начальном этапе производится вырезание фрагмента записи, содержащего взрыв. Далее выполняется быстрое прямое преобразование Фурье и осуществляется построение амплитудно-частотной характеристики воздействия для анализа преобладающих частот. Затем проводится фильтрация записи полосовым фильтром в частотной области с учетом рабочего диапазона сейсмосаписывающего оборудования и обратное преобразование Фурье. После указанного для полученной записи выполняется выделение трендов, описанных функциями 0-го, 1-го, 2-го, 3-го порядков. Заключительным шагом является последовательная процедура исключения трендов и численного интегрирования: подбором определяется, при исключении каких трендов из акселерограммы, велосигаммы и сейсмограммы может быть получена пригодная для прямого динамического расчета сейсмограмма.



В результате проведения работы показано, что исключение тренда из велосиграмм позволило повысить качество обработки сигналов и получить сейсмограммы, подходящие для корректного проведения прямого динамического расчета зданий и сооружений.

## Литература

- [1] Садовский М. А. Геофизика и физика взрыва. Избранные труды. / М. А. Садовский. М: Наука, 1999. 440 с.
- [2] Дарбинян Т.П., Федосеев А.В., Яваров А.В., Тяпкина П.А. Критерии оценки сейсмического воздействия взрывных работ на здания и сооружения в мировой практике и нормативных документах // Горный журнал. 2024. №3. С.17-24. DOI: 10.17580/gzh.2024.03.02.
- [3] Нуждин Л.В., Михайлов В.С., Коновалова С.В. Уточнение методов оценки динамических нагрузок на фундаменты каркасных зданий в условиях техногенных сейсмических воздействий // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2019. № 3 (40). С. 53-60.
- [4] Тяпкина П.А., Яваров Федосеев А.В., А.В. Первичная обработка инструментальных записей колебаний сооружений, вызванных проведением буровзрывных работ // Инженерные исследования. №2 (17), 2024. С. 3-12.
- [5] Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. - Москва : ДМК, 2008. - 595 с. ISBN 5-94074-352-8.
- [6] Бате К.Ю. Методы конечных элементов / К.-Ю. Бате; пер. с англ. В. П. Шидловского ; под ред. Л. И. Турчака. - Москва : Физматлит, 2010. - 1022 с. ISBN 978-5-9221-1181-2.
- [7] Гераймович Ю.Д., Евзеров И.Д., Киричок В.В. Колесников А.В. и другие Программный комплекс ЛИРА 10.12. Руководство пользователя. 2021. – 857 с.

## УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ВИБРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ В НЕВЕСОМОСТИ

Якимов Т.А., Шарифулин А.Н.

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
[yakimovtimofei@yandex.ru](mailto:yakimovtimofei@yandex.ru), [shariulin@bk.ru](mailto:shariulin@bk.ru)

Изучение вибрационной конвекции в цилиндрической полости актуально в связи с технологическими экспериментами как в земных условиях, так и в условиях орбитальных станций [1]. Теоретическое изучение вибрационной конвекции в круговом цилиндре начато в [2-4] где рассмотрена вибрационная конвекция в невесомости в круговом цилиндре с гармоническим распределением температуры на твердой границе, соответствующим заданному градиенту температуры (равновесный градиент температуры) в твердом массиве, окружающем жидкость. В [2,3] начато изучение влияния направления вибраций на структуру одновихревого осредненного течения в полости, которое в свою очередь определяет режимы теплопередачи через нее. В [4] был обнаружен новый двухвихревой режим осредненного течения, который приводит к более интенсивному режиму теплопередачи. Значение числа Прандтля в этих расчетах полагалось равным 1. Жидкостей и газов с таким значением числа Прандтля не существует, поэтому в настоящей работе значения числа Прандтля полагались равными 0.7, 7 и 14, что соответствует воздуху, воде и трансформаторному маслу соответственно. С содержанием работ [2-4] можно ознакомиться в монографии [5],

Цель настоящей работы, – на основе численного решения полных уравнений тепловой вибрационной конвекции определить влияние плавного изменения направления вибраций в невесомости относительно заданного в массиве градиента температуры на интенсивность и структуру осредненного течения.

В работе исследовано влияние плавного циклического изменения угла между направлением равновесного нагрева и вибраций, т.е. направления вибраций относительно равновесного градиента температуры. При умеренных надкритичностях для всех, указанных выше, значений числа Прандтля изменение направления вибраций может либо плавно трансформировать структуру осредненного течения от кругового к овальному и обратно, либо, если амплитуда изменений направления вибраций выше критической, приводит к гистерезисным переходам между отличающимися направлением циркуляции одновихревыми режимами. Показано, что увеличение вибрационного числа Грасгофа при числах Прандтля 7 и 14 радикально усложняет картину гистерезисных переходов между стационарными состояниями. Возникают гистерезисные переходы между одновихревыми и двухвихревыми режимами вибрационной конвекции. Расчеты показывают, что в зависимости от цели технологических экспериментов, такие переходы можно либо предотвращать, либо наоборот вызывать.

### Литература

- [1] Зюзгин А. В. Гидромеханика реальной невесомости: учебное пособие. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. – 88 с.
- [2] Шарифулин А. Н. Вибрационная конвекция в цилиндрической полости в невесомости при произвольных ориентациях направления подогрева В кн. Конвективные течения. – Пермь: Пермск.пед. ин-т. – 1981.– С. 22– 29.
- [3] Gershuni G. Z., Zhukhovitsky E. M., Sharifulin A. N. Vibrational thermal convection in cylindrical cavity. Num. Methods Contin. Mech., 1983, vol. 14, N 4, pp. 21–31.
- [4] Sharifulin A. N. Supercritical vibration-induced thermal convection in a cylindrical cavity. J. Paper Fluid Mech. Soviet Res., 1986. vol. 15, N2. 28–23.
- [5] Gershuni G. Z., Luybimov D. V. Thermal vibrational convection. John Wiley & Sons. England. 1998, 358 p.