



Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях

12-13 ноября 2025г., Пермь

Программа и тезисы

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях

**Отчетная конференция по итогам 2 этапа
выполнения проекта**

12-13 ноября 2025г.

Пермь, 2025

УДК [539.3](063)

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях. Отчетная конференция по итогам 2 этапа выполнения проекта. Пермь, 12-13 ноября 2025г. Программа и тезисы докладов /ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2025. – 142с.

ISBN 978-5-6053637-3-6

Представлены программа и тезисы докладов конференции **«Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях. Отчетная конференция по итогам 2 этапа выполнения проекта»**, проводимой Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Пермским федеральным исследовательским центром Уральского отделения Российской академии наук 12 - 13 ноября 2025 г.

Сборник отражает тематику конференции и содержит результаты исследований по проекту.

Издается в авторской редакции.

Издается по решению Объединенного Ученого совета 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.

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Основная цель конференции состоит в подведении итогов 2 этапа выполнения крупного научного проекта по Соглашению с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2024-535 от 23 апреля 2024г.

Конференция направлена на обсуждение результатов, полученных участниками, согласно плану-графику работ на данный период и корректировку дальнейших исследований следующего этапа выполнения проекта.



Номера задач, указанные в тезисах докладов, соответствующие плану-графику работ, приведены в Приложении.

Научный комитет

Матвеев В.П. – академик РАН, председатель конференции, руководитель проекта;

Мизев А.И. – д.ф.м.н., директор «ИМСС УрО РАН» - филиала ПФИЦ УрО РАН;

Барях А.А. – академик РАН, руководитель научного направления «Горные науки» ПФИЦ УрО РАН;

Горячева И.Г. - академик РАН, ИПМех РАН (г. Москва), заведующий лабораторией;

Плехов О.А. – член-корреспондент РАН, директор ПФИЦ УрО РАН;

Левин Л.Ю. - член-корреспондент РАН, директор «ГИ УрО РАН» - филиала ПФИЦ УрО РАН;

Шаныгин А.Н. – ЦАГИ (г. Жуковский), к.т.н., начальник лаборатории.

Содержание

	Стр.
Общая информация.....	3
Программа конференции.....	9
Тезисы.....	19
Матвеев В.П., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Федоров А.Ю., Лекомцев С.В. Применение распределенных волоконно-оптических датчиков для анализа деформаций композитных конструкций	21
Конюхов В.А., Матвеев В.П., Степанов Р.А., Сероваев Г.С. Локализация сосредоточенной нагрузки на поверхности деформируемого тела с помощью нейронных сетей	23
Степанов Р.А. Обучение нейронной сети предсказывать параметры деформации балки под тепловой нагрузкой	26
Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Конюхов В.А., Каменских А.О. Система регистрации и визуализации полей деформаций на основе распределенных волоконно-оптических датчиков	28
Роговой А.А., Столбова О.С. Построение микроструктурной модели поведения ферромагнитного сплава с памятью формы в магнитных и силовых полях	30
Лебедев А.В., Лысенко С.Н. Синтез магнитных жидкостей на основе силоксановых и углеводородных жидкостей-носителей, обладающих низкой (до минус 60 ⁰ С) температурой замерзания	33
Иванов А.С., Лебедев А.В., Косков М.А. Экспериментальная методика измерения кривой намагничивания мягких магнитных материалов инкрементально-дифференциальным методом	35
Крыласова О.С., Голдобин Д.С., Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Расход магнитной жидкости из магнитоакустического контакта	37
Беляев А.Ю., Мохирева К.А., Морозов И.А., Изюмов Р.И. Экспериментальное определение механических свойств нанокompозитов, связующим которых является бутадиен-стирольный каучук	39
Мохирева К.А., Свистков А.Л. Сравнительный анализ экспериментальных данных о механических свойствах нанокompозитов с целью установления связи между рецептурой материалов и их механическими свойствами	42
Изюмов Р.И., Свистков А.Л. Теоретическая основа и практическая реализация метода определения положения и формы включений под поверхностью эластомерного нанокompозита	44
Морозов И.А., Изюмов Р.И., Беляев А.Ю. Исследование распределения наполнителя в наполненной резине методами индентирования и машинного обучения	46
Ведерников Д.В., Левченков М. Д., Фомин Д. Ю. Исследование весовой эффективности конструктивно-силовых схем лопасти ветрогенератора	48
Левченков М.Д. Оптимизация структуры реберной сетки отсека фюзеляжа, содержащей нерегулярности углов наклона ребер	50
Шаныгин А.Н., Фомин Д.Ю. Общая схема демонстратора комплексной встроенной системы мониторинга технического состояния и создание отдельных его частей для	52

агрегатов/отсеков/фрагментов гипотетической интеллектуальной про-бионической конструкции	
Шаныгин А.Н. Экспериментальное и численное исследование эффективности положительной синергетики от взаимодействия встроенной системы мониторинга с элементами силовой конструкции	54
Фомин Д. Ю., Шаныгин А.Н., Марескин И.В. Разработка образцов фрагментов конструкции, конструктивно-подобных образцов, элементарных образцов для гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин	56
Марескин И.В., Фомин Д.Ю. Оценка положительной синергетики от использования ресурсосберегающих (эко) способов изготовления	58
Банников М.В., Баяндин Ю.В., Никитюк А.С., Юрина А.Ю., Князев Н.А. Результаты структурных исследований стадийности развития поврежденности в композитных материалах методами рентгеновской томографии, акустической эмиссии и корреляции цифровых изображений	60
Наймарк О.Б., Савельева Н.В., Уваров С.В., Оборин В.А., Балахнин А.Н. Инварианты действия как параметры оптимизации свойств сплавов авиационного моторостроения и космической техники при комбинированных динамических и усталостных нагружениях	62
Дудин Д.С., Келлер И.Э. Моделирование оксидной и сульфидно-оксидной коррозии жаропрочного сплава с учётом напряжений	64
Казанцев А.Л., Смирнов С.А., Гачегова Е.А., Пойлов В.З., Келлер И.Э. Исследование стойкости авиационных сплавов к воздействию высокотемпературной коррозии с учетом поверхностных остаточных напряжений	66
Изюмова А.Ю., Ложкин Д.В., Кудряшев И.С., Вережак М.В., Угольников М.В. Исследование влияния лазерной ударной обработки на склонность к наводораживанию и коррозионное поведение сплава ВТ6	69
Торская Е.В., Хади А.А., Малышев В.Н., Буковский П.О., Муравьева Т.И., Щербакова О.О. Влияние мелкодисперсного антифрикционного полимерного модификатора на трение и износ МДО покрытий на алюминиевых сплавах	71
Горячева И.Г., Яковенко А.А. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в материалах в условиях фрикционного взаимодействия с учетом влияния абразивного изнашивания контактирующих поверхностей и наличия остаточных напряжений	73
Цуканов И.Ю., Любичева А.Н. Решение контактной задачи об установившемся скольжении периодического рельефа по поверхности вязкоупругого основания при наличии адгезионного притяжения с учетом зависимости поверхностной энергии от предыстории контактного взаимодействия поверхностей	76
Бельтюков Н.Л., Паньков И.Л., Ударцев А.А. Предварительные результаты опытно-промышленных испытаний технологии повторной отработки запасов калийных руд Верхнекамского месторождения	80
Барях А.А., Цаюков А.А., Самodelкина Н.А., Девятков С.Ю. Модель упруго-вязкопластического деформирования соляных междукламерных целиков	82
Евсеев А.В., Ломакин И.С., Федосеев А.К. Инженерные критерии устойчивости структурно-неоднородных горнотехнических конструкций	84
Кузнецова Ю.Л. Сорбция газа водорастворимыми аэрозольными частицами	86
Демин В.А., Демина Т.В., Коновалов В.В., Любимова Т.П. трехмерное численное моделирование процесса переноса паров кремния в условиях среднего вакуума с помощью вычислительного пакета CRYSTARPACK	88
Левин Л.Ю., Мальцев С.В., Семин М.А., Суханов А.Е. Натурные измерения параметров	

воздушных потоков при различных режимах проветривания рабочих зон калийных рудников	91
Таций А.В., Трушкова Н.А., Мальцев С.В., Левин Л.Ю. Параметризация математической модели воздухораспределения в тупиковой горной выработке	94
Семин М.А., Зайцев А.В., Колесов Е.В. Разработка, программирование и отладка алгоритма решения обратной задачи воздухораспределения в сети горных выработок	97
Окатыев Р.С., Колесниченко И.В., Митрополит И.Ю. Математическое моделирование изотермических закрученных транзитных течений проводящей жидкости во внешнем магнитном поле	101
Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л., Полуянов А.О., Ельтищев В.А. Многообразие режимов закрученных течений жидкого металла под действием встречно-вращающихся магнитных полей	103
Озерных В.С., Халилов Р.И., Шестаков А.В. Характеристики закрученных транзитных течений электропроводных сред, лежащих в основе методики бесконтактного измерения расхода жидкого металла	106
Прокопьев С.А., Любимова Т.П. Двойная диффузионная конвекция в плоском слое с границами низкой теплопроводности	108
Любимова Т.П., Шубенков И.С., Ожгибесова Н.А. Возникновение и нелинейные режимы конвекции многокомпонентных смесей в системах слоев разной проницаемости, имитирующих синклинальную геологическую складку	110
Любимова Т.П., Крапивина Е.Н., Ковалевская К.В. Возникновение и нелинейные режимы конвекции вязкоупругой жидкости в замкнутой полости, подогреваемой снизу ..	113
Шарифулин В.А., Любимова Т.П. Смешанная тепловая конвекция вязкоупругой жидкости в квадратной полости с движущейся верхней стенкой при подогреве снизу	115
Любимова Т.П., Иванцов А.О., Кучинский М.О. Влияние вибраций на фронт вытеснения между ньютоновской и вязкопластической жидкостью в ячейке Хеле-Шоу	117
Алабужев А.А. Вынужденные трансляционные колебания капли с учетом гистерезиса краевого угла	120
Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н. Технологии селективного забора воды из стратифицированных водоемов	122
Марышев Б.С., Клименко Л.С. Конвективная устойчивость фильтрации через горизонтальный слой пористой среды с учетом закупорки	124
Денисова М.О., Костарев К.Г. Конвекция Марангони в капле с пузырьком газа, находящейся в неоднородном растворе ПАВ	127
Шмыров А.В., Мизев А.И., Брацун Д.А., Сираев Р.Р. Динамические явления в процессах адсорбции-десорбции при одновременном действии концентрационно- и термокапиллярного эффектов	130
Брацун Д.А., Уточкин В.Ю., Шмыров А.В., Мизёв А.И. Устойчивость слоя поверхностно-активного вещества под действием вязких напряжений со стороны объемного течения	133
Сухановский А.Н., Васильев А.Ю. Влияние локализованного форсинга и типа граничных условий на крупномасштабную конвективную циркуляцию в квадратной полости	135
Приложение	137

Программа



12 ноября

9:50 – 10:00

Открытие работы конференции

Председатель: Матвеенко Валерий Павлович

Секция «Механика новых материалов и конструкций»

Заседание 1 Теоретические и экспериментальные исследования smart-материалов и систем мониторинга с использованием технологий нейронных сетей

Ведущий: Матвеенко Валерий Павлович

10:00 – 10:10	Матвеенко В.П., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Федоров А.Ю., Лекомцев С.В. Применение распределенных волоконно-оптических датчиков для анализа деформаций композитных конструкций Докладчик: Сероваев Григорий Сергеевич
10:10 – 10:20	Конюхов В.А., Матвеенко В.П., Степанов Р.А., Сероваев Г.С. Локализация сосредоточенной нагрузки на поверхности деформируемого тела с помощью нейронных сетей Докладчик: Конюхов Владислав Авенирович
10:20 – 10:30	Степанов Р.А. Обучение нейронной сети предсказывать параметры деформации балки под тепловой нагрузкой Докладчик: Степанов Родион Александрович
10:30 – 10:40	Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Конюхов В.А., Каменских А.О. Система регистрации и визуализации полей деформаций на основе распределенных волоконно-оптических датчиков Докладчик: Сероваев Григорий Сергеевич
10:40 – 10:50	Роговой А.А., Столбова О.С. Построение микроструктурной модели поведения ферромагнитного сплава с памятью формы в магнитных и силовых полях Докладчик: Столбова Ольга Серафимовна
10:50 – 11:00	Обсуждение представленных докладов

Заседание 2 Синтез низкотемпературных магнитных жидкостей. Разработка технологии низкотемпературного ультразвукового контроля с применением магнитожидкостного акустического контакта

Ведущий: Райхер Юрий Львович

11:00 – 11:10	Лебедев А.В., Лысенко С.Н. Синтез магнитных жидкостей на основе силиконовых и углеводородных жидкостей-носителей, обладающих низкой (до минус 60 0С) температурой замерзания.
---------------	---

Докладчик: Лебедев Александр Владимирович	
11:10 – 11:20	Иванов А.С., Лебедев А.В., Косков М.А. Экспериментальная методика измерения кривой намагничивания мягких магнитных материалов инкрементально-дифференциальным методом Докладчик: Иванов Алексей Сергеевич
11:20 – 11:30	Крыласова О.С., Голдобин Д.С., Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Расход магнитной жидкости из магнитоакустического контакта Докладчик: Райхер Юрий Львович
11:30 – 11:40	Обсуждение представленных докладов

11:40 – 12:00	Кофе-брейк
---------------	------------

Заседание 3 Определение механических свойств и построение моделей деформирования новых эластомерных нанокомпозитов

Ведущий: Келлер Илья Эрнстович

12:00 – 12:10	Беляев А.Ю., Мохирева К.А., Морозов И.А., Изюмов Р.И. Экспериментальное определение механических свойств нанокомпозитов, связующим которых является бутадиен-стирольный каучук Докладчик: Беляев Антон Юрьевич
12:10 – 12:20	Мохирева К.А., Свистков А.Л. Сравнительный анализ экспериментальных данных о механических свойствах нанокомпозитов с целью установления связи между рецептурой материалов и их механическими свойствами Докладчик: Мохирева Ксения Александровна
12:20 – 12:30	Изюмов Р.И., Свистков А.Л. Теоретическая основа и практическая реализация метода определения положения и формы включений под поверхностью эластомерного нанокомпозита Докладчик: Изюмов Роман Игоревич
12:30 – 12:40	Морозов И.А., Изюмов Р.И., Беляев А.Ю. Исследование распределения наполнителя в наполненной резине методами индентирования и машинного обучения Докладчик: Морозов Илья Александрович
12:40 – 12:50	Обсуждение представленных докладов

12:50 – 13:40	Обед
---------------	------

Заседание 4 Создание пробионических композитных конструкций и подходов к мониторингу их технического состояния на базе оптоволоконных датчиков

Ведущий: Матвеев Валерий Павлович

13:40 – 13:50	Ведерников Д.В., Левченков М. Д., Фомин Д. Ю. Исследование весовой эффективности конструктивно-силовых схем лопасти ветрогенератора Докладчик: Ведерников Дмитрий Вячеславович
13:50 – 14:00	Левченков М.Д. Оптимизация структуры реберной сетки отсека фюзеляжа, содержащей нерегулярности углов наклона ребер Докладчик: Левченков Михаил Дмитриевич
14:00 – 14:10	Шаныгин А.Н., Фомин Д.Ю. Общая схема демонстратора комплексной встроенной системы мониторинга технического состояния и создание отдельных его частей для агрегатов/отсеков/фрагментов гипотетической интеллектуальной про-бионической конструкции Докладчик: Шаныгин Александр Николаевич
14:10 – 14:20	Шаныгин А.Н. Экспериментальное и численное исследование эффективности положительной синергетики от взаимодействия встроенной системы мониторинга с элементами силовой конструкции Докладчик: Шаныгин Александр Николаевич
14:20 – 14:30	Фомин Д. Ю., Шаныгин А.Н., Марескин И.В. Разработка образцов фрагментов конструкции, конструктивно-подобных образцов, элементарных образцов для гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин Докладчик: Фомин Данил Юрьевич
14:30 – 14:40	Марескин И.В., Фомин Д.Ю. Оценка положительной синергетики от использования ресурсосберегающих (эко) способов изготовления Докладчик: Марескин Иван Владимирович
14:40 – 14:50	Обсуждение представленных докладов

Секция «Оценка прочности и ресурса машин, конструкций и сооружений»

Заседание 5 Разработка фундаментальных основ методологии прогнозирования свойств, ресурса и мониторинг состояния сложных инженерных и природных систем

Ведущий: Наймарк Олег Борисович

14:50 – 15:00	Банников М.В., Баяндин Ю.В., Никитюк А.С., Юрина А.Ю., Князев Н.А. Результаты структурных исследований стадийности развития поврежденности в композитных материалах методами рентгеновской томографии, акустической эмиссии и корреляции цифровых изображений Докладчик: Банников Михаил Владимирович
15:00 – 15:10	Наймарк О.Б., Савельева Н.В., Уваров С.В., Оборин В.А.,

	Балахнин А.Н. Инварианты действия как параметры оптимизации свойств сплавов авиационного моторостроения и космической техники при комбинированных динамических и усталостных нагрузениях Докладчик: Наймарк Олег Борисович
15:10 – 15:20	Обсуждение представленных докладов

15:20 – 15:40	Кофе-брейк
---------------	------------

Заседание 6 Оптимизация метода лазерной ударной проковки металлов и сплавов

Ведущий: Плехов Олег Анатольевич

15:40 – 15:50	Казанцев А.Л., Смирнов С.А., Гачегова Е.А., Пойлов В.З., Келлер И.Э. Исследование стойкости авиационных сплавов к воздействию высокотемпературной коррозии с учетом поверхностных остаточных напряжений Докладчик: Казанцев Александр Леонидович
15:50 – 16:00	Дудин Д.С., Келлер И.Э. Моделирование оксидной и сульфидно-оксидной коррозии жаропрочного сплава с учётом напряжений Докладчик: Дудин Дмитрий Сергеевич
16:00 – 16:10	Изюмова А.Ю., Ложкин Д.В., Кудряшев И.С., Вережак М.В., Угольников М.В. Исследование влияния лазерной ударной обработки на склонность к наводораживанию и коррозионное поведение сплава ВТ6 Докладчик: Изюмова Анастасия Юрьевна
16:10 – 16:20	Торская Е.В., Хади А.А., Малышев В.Н., Буковский П.О., Муравьева Т.И., Щербакова О.О. Влияние мелкодисперсного антифрикционного полимерного модификатора на трение и износ МДО покрытий на алюминиевых сплавах Докладчик: Торская Елена Владимировна
16:20 – 16:30	Горячева И.Г., Яковенко А.А. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в материалах в условиях фрикционного взаимодействия с учетом влияния абразивного изнашивания контактирующих поверхностей и наличия остаточных напряжений Докладчик: Яковенко Анастасия Александровна
16:30 – 16:40	Цуканов И.Ю., Любичева А.Н. Решение контактной задачи об установившемся скольжении периодического рельефа по поверхности вязкоупругого основания при наличии адгезионного притяжения с учетом зависимости поверхностной энергии от предыстории контактного взаимодействия поверхностей Докладчик Любичева Анастасия Николаевна
16:40 – 17:00	Обсуждение представленных докладов

13 ноября

Секция «Оценка прочности и ресурса машин, конструкций и сооружений»

Заседание 7 Разработка научных основ технологии повторной отработки запасов полезных ископаемых

Ведущий: Барях Александр Абрамович

9:30 – 9:40	Бельтюков Н.Л., Паньков И.Л., Ударцев А.А. Предварительные результаты опытно-промышленных испытаний технологии повторной отработки запасов калийных руд Верхнекамского месторождения Докладчик: Бельтюков Николай Леонидович
9:40 – 9:50	Барях А.А., Цаюков А.А., Самоделкина Н.А., Девятков С.Ю. Модель упруго-вязкопластического деформирования соляных междокамерных целиков Докладчик: Цаюков Андрей Андреевич
9:50 – 10:00	Евсеев А.В., Ломакин И.С., Федосеев А.К. Инженерные критерии устойчивости структурно-неоднородных горнотехнических конструкций Докладчик: Евсеев Антон Владимирович
10:00 – 10:10	Обсуждение представленных докладов

Секция «Турбулентность, магнитная гидродинамика, тепломассоперенос в многофазных и многокомпонентных средах»

Заседание 8 Разработка моделей газодинамики и тепломассообмена в подземных горных выработках

Ведущий: Любимова Татьяна Петровна

10:10 – 10:20	Кузнецова Ю.Л. Сорбция газа водорастворимыми аэрозольными частицами Докладчик: Кузнецова Юлия Леонидовна
10:20 – 10:30	Демин В.А., Демина Т.В., Коновалов В.В., Любимова Т.П. трехмерное численное моделирование процесса переноса паров кремния в условиях среднего вакуума с помощью вычислительного пакета CRYSTARPACK Докладчик: Коновалов Владимир Владиславович
10:30 – 10:40	Левин Л.Ю., Мальцев С.В., Семин М.А., Суханов А.Е. Натурные измерения параметров воздушных потоков при различных режимах проветривания рабочих зон калийных рудников

Докладчик: Суханов Андрей Евгеньевич	
10:40 – 10:50	Таций А. В., Трушкова Н. А., Мальцев С. В., Левин Л. Ю. Параметризация математической модели воздухораспределения в тупиковой горной выработке Докладчик: Таций Алексей Вадимович
10:50 – 11:00	Семин М.А., Зайцев А.В., Колесов Е.В. Разработка, программирование и отладка алгоритма решения обратной задачи воздухораспределения в сети горных выработок Докладчик: Семин Михаил Александрович
11:00 – 11:10	Обсуждение представленных докладов

11:10 – 11:30	Кофе-брейк
---------------	------------

Заседание 9. Разработка научных основ устройств и технологий использования жидкометаллического теплоносителя в ядерной энергетике

Ведущий: Фрик Петр Готлобович

11:30 – 11:40	Окатьев Р.С., Колесниченко И.В., Митрополит И.Ю. Математическое моделирование изотермических закрученных транзитных течений проводящей жидкости во внешнем магнитном поле Докладчик: Окатьев Роман Сергеевич
11:40 – 11:50	Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л., Полуянов А.О., Ельтищев В.А. Многообразие режимов закрученных течений жидкого металла под действием встречно-вращающихся магнитных полей Докладчик: Мамыкин Андрей Дмитриевич
11:50 – 12:00	Озерных В.С., Халилов Р.И., Шестаков А.В. Характеристики закрученных транзитных течений электропроводных сред, лежащих в основе методики бесконтактного измерения расхода жидкого металла Докладчик: Озерных Владимир Сергеевич
12:00 – 12:10	Обсуждение представленных докладов

Заседание 10 Развитие моделей конвективного тепломассопереноса в многофазных и многокомпонентных средах, в насыщенных многокомпонентными смесями неоднородных пористых средах

Ведущий: Мизев Алексей Иванович

12:10 – 12:20	Прокопьев С.А., Любимова Т.П. Двойная диффузионная конвекция в плоском слое с границами низкой теплопроводности Докладчик: Прокопьев Сергей Анатольевич
12:20 – 12:30	Любимова Т.П., Шубенков И.С., Ожгибесова Н.А. Возникновение и нелинейные режимы конвекции многокомпонентных смесей в системах слоев разной проницаемости, имитирующих

	синклинальную геологическую складку Докладчик: Шубенков Иван Сергеевич
12:30 – 12:40	Любимова Т.П., Крапивина Е.Н., Ковалевская К.В. Возникновение и нелинейные режимы конвекции вязкоупругой жидкости в замкнутой полости, подогреваемой снизу Докладчик: Любимова Татьяна Петровна
12:40 – 12:50	Шарифулин В.А., Любимова Т.П. Смешанная тепловая конвекция вязкоупругой жидкости в квадратной полости с движущейся верхней стенкой при подогреве снизу Докладчик: Шарифулин Вадим Альбертович

12:50 – 13:40	Обед
---------------	------

Заседание 10 Развитие моделей конвективного теплопереноса в многофазных и многокомпонентных средах, в насыщенных многокомпонентными смесями неоднородных пористых средах (продолжение)

Ведущий: Любимова Татьяна Петровна

13:40 – 13:50	Любимова Т.П., Иванцов А.О., Кучинский М.О. Влияние вибраций на фронт вытеснения между ньютоновской и вязкопластической жидкостью в ячейке Хеле-Шоу Докладчик: Иванцов Андрей Олегович
13:50 – 14:00	Алабужев А.А. Вынужденные трансляционные колебания капли с учетом гистерезиса краевого угла Докладчик: Алабужев Алексей Анатольевич
14:00 – 14:10	Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н. Технологии селективного забора воды из стратифицированных водоемов Докладчик: Любимова Татьяна Петровна
14:10 – 14:20	Марышев Б.С., Клименко Л.С. Конвективная устойчивость фильтрации через горизонтальный слой пористой среды с учетом закупорки Докладчик: Марышев Борис Сергеевич
14:20 – 14:30	Брацун Д.А., Уточкин В.Ю., Шмыров А.В., Мизёв А.И. Устойчивость слоя поверхностно-активного вещества под действием вязких напряжений со стороны объемного течения Докладчик Уточкин Владимир Юрьевич
14:30 – 14:40	Шмыров А.В., Мизев А.И., Брацун Д.А., Сираев Р.Р. Динамические явления в процессах адсорбции-десорбции при одновременном действии концентрационно- и термокапиллярного эффектов Докладчик: Сираев Рамиль Рифгатович
14:40 – 15:00	Денисова М.О., Костарев К.Г. Конвекция Марангони в капле с пузырьком газа, находящейся в неоднородном растворе ПАВ

	Докладчик: Денисова Мария Олеговна
15:00 – 15:10	Сухановский А.Н., Васильев А.Ю. Влияние локализованного форсинга и типа граничных условий на крупномасштабную конвективную циркуляцию в квадратной полости Докладчик: Сухановский Андрей Николаевич
15:10 – 15:20	Обсуждение представленных докладов
15:20 – 15:40	Подведение итогов. Закрытие конференции Председатель: Матвеев Валерий Павлович

Тезисы докладов



ПРИМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Матвеев В.П., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Федоров А.Ю., Лекомцев С.В.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Развитие технологий проектирования и изготовления конструкций приводит к необходимости надежного контроля их механического состояния на различных стадиях эксплуатации. Особый практический интерес представляет измерение распределений деформаций в типовых конструктивных элементах типа пластин и оболочек, где возможна реализация сложных полей деформаций, вызванных особенностями механических свойств материала, геометрией конструкции и характером прикладываемых нагрузок.

Перспективным решением является концепция «умных» материалов, предполагающая интеграцию сенсорных систем непосредственно в структуру материала на этапе его изготовления. Среди различных типов датчиков волоконно-оптические датчики (ВОД) обладают рядом уникальных преимуществ: минимальные размеры, невосприимчивость к электромагнитным помехам, возможность мультиплексирования большого числа датчиков на одном волокне. Распределенные волоконно-оптические датчики (РВОД) на основе рэлеевского рассеяния представляют собой перспективную технологию для мониторинга деформаций по всей длине оптического волокна. Этот метод использует рэлеевское рассеяние, возникающее при прохождении света через волокно из-за микроскопических неоднородностей в его структуре. При воздействии внешних факторов, таких как деформация или изменение температуры, происходит сдвиг спектральной характеристики рассеянного света. Анализируя этот сдвиг вдоль волокна с помощью оптической рефлектометрии в частотной области (Optical Frequency Domain reflectometry, OFDR), можно точно определять распределение измеряемого параметра.

Ключевым преимуществом РВОД на основе рэлеевского рассеяния является высокая пространственная разрешающая способность, что обеспечивает востребованность данных датчиков в качестве элемента систем мониторинга механического состояния конструкций. РВОД на основе рэлеевского рассеяния позволяют получать практически непрерывный профиль деформаций или температуры, что критически важно для выявления локальных концентраций деформаций, повреждений и оценки общего механического состояния объекта.

Целью настоящей работы является проведение комплексного экспериментального исследования полей деформаций в пластинах и оболочках с внедренными или расположенными на поверхности ВОД при статическом нагружении, а также верификация полученных данных с использованием результатов численного моделирования.

В качестве объектов исследования были использованы плоские пластины и цилиндрические оболочки, изготовленные из двух типов композитных материалов: композиты с армированием непрерывными волокнами, и композитные материалы, полученные с помощью 3D-печати методом послойного наплавления из дисперсно-армированного короткими углеродными волокнами филамента. Оптическое волокно для распределенного измерения деформаций встраивалось в материал в процессе 3D-печати и/или размещалось на поверхности исследуемого объекта.

Для пластины использовались граничные условия в виде жесткого закрепления по двум сторонам, при этом сосредоточенная нагрузка прикладывалась в различных ее участках. Оптическое волокно располагалось по всей рабочей зоне пластины. Цилиндрическая оболочка жестко закреплялась по двум сторонам, а изгибная нагрузка прикладывалась в различных участках по ее длине. Оптическое волокно было расположено вдоль длины оболочки и по спирали.

В процессе изготовления пластины по технологии послойного наплавления проводилась непрерывная регистрация технологических деформаций с помощью внедряемых ВОД.

В ходе проведенных испытаний продемонстрирована работоспособность внедренных ВОД как в процессе изготовления, так и при последующем нагружении пластины. Получены распределения деформаций в рабочей зоне пластины без дефектов и с дефектами в виде отверстий различного диаметра. Для цилиндрической оболочки получены результаты распределенных измерений осевой компоненты тензора деформаций с использованием прямолинейных участков оптического волокна, расположенных вдоль образующей, а также измерения деформаций на участках волокна, намотанных по спирали вдоль оболочки.

Проведено сопоставление результатов экспериментального измерения деформаций с помощью распределенных ВОД с результатами численного моделирования с помощью метода конечных элементов.

Проведенные исследования подтвердили эффективность использования волоконно-оптических датчиков для комплексного анализа деформирования композитных пластин и оболочек при статических нагрузках. Использование распределенных измерений обеспечивает как локальную, так и пространственную оценку механического состояния конструкции, позволяя выявлять зоны концентрации деформаций.

Полученные подходы могут быть использованы при создании интеллектуальных систем мониторинга механического состояния конструкций, а также в задачах калибровки численных моделей и построения цифровых двойников.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.3.1.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Конюхов В.А., Матвеев В.П., Степанов Р.А., Сероваев Г.С.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

В работе проведено численное исследование, посвященное применению машинного обучения для решения обратных задач механики деформируемого твердого тела. В качестве модельного примера рассмотрена прямоугольная пластина из упругого материала, жестко закрепленная по двум коротким сторонам, под действием сосредоточенной вертикальной нагрузки. Результатом решения обратной задачи являются координаты точки приложения нагрузки на основе информации о значениях деформаций в конечном числе точек (рис. 1).

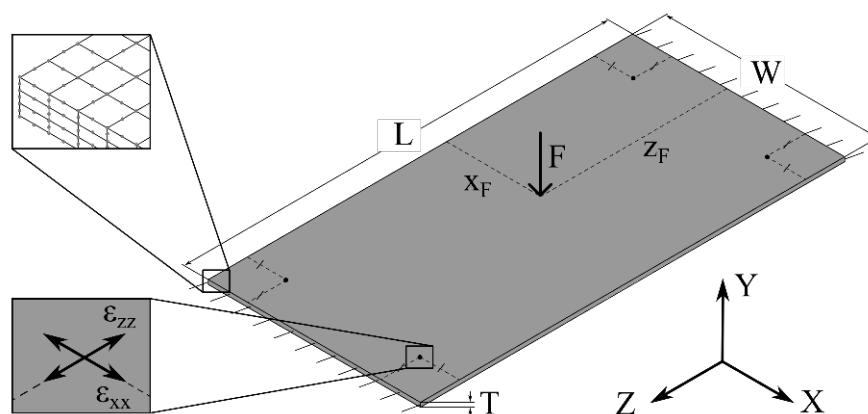


Рис. 1. – Тонкостенная пластина под действием сосредоточенной нагрузки

Набор данных, необходимый для подготовки модели машинного обучения, сформирован путем решения серии прямых задач определения напряженно-деформированного состояния (НДС) с применением метода конечных элементов. Результат решения каждой отдельной прямой задачи представляет собой пару значений деформаций ε_{xx} и ε_{zz} , полученную в конечном числе точек пластины, при известном положении сосредоточенной нагрузки (x_F, z_F) . Набор значений деформаций в дальнейшем именуется входным вектором, а его компоненты – признаками.

В силу линейности прямой задачи значения деформаций для каждой отдельной точки приложения нагрузки пропорциональны величине ее интенсивности. Чтобы значения признаков были независимы от величины нагружения в качестве входных векторов были использованы их нормированные значения

$$\varepsilon_n^{norm} = \frac{\varepsilon_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \varepsilon_n^2}}$$

где ε_n^{norm} – n -ый нормированный признак входного вектора, ε_n – n -ый исходный признак входного вектора, N – количество признаков.

Заключительным этапом подготовки данных было их разбиение случайным образом на обучающую, проверочную и тестовую выборку. Не смотря на широкое распространение разбиения данных по схеме 80%:20% для обучения и тестирования моделей машинного обучения [1], данный подход обладает недостатком, известным как «утечка информации», приводящим к переобучению модели на тестовом наборе данных [2].

В связи с этим в данной работе было реализовано разбиение по следующей схеме: обучающая выборка принята объемом в 60% от общего набора данных, проверочная выборка, используемая для определения гиперпараметров и проведения контроля за эффектами переобучения и недообучения – 20%, тестовая выборка, используемая для заключительной оценки точности – 20%.

Для решения поставленной задачи использована модель машинного обучения, известная как многослойный перцептрон (multilayer perceptron или MLP). Архитектура модели, используемая в данной работе, состоит из входного и выходного слоя, а также двух скрытых слоев (рис. 2). Общее количество обучаемых параметров составляет 1410 ед., из которых 1344 — весовые коэффициенты, 66 — смещения.

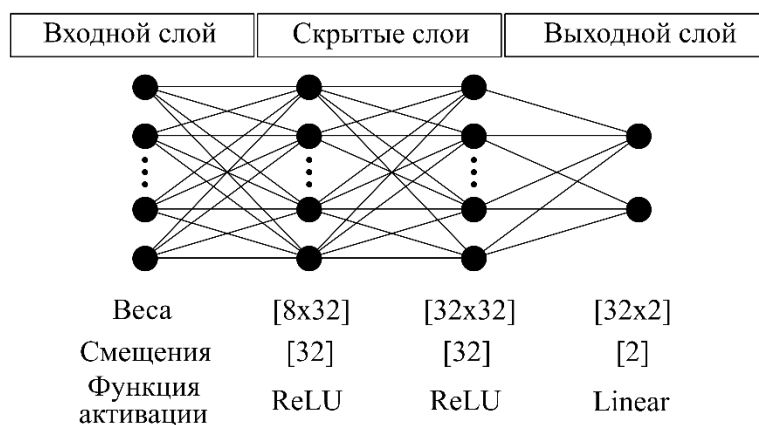


Рис. 2. – Архитектура используемой нейронной сети

На основании результатов обучения более 100 единиц MLP проведен комплексный анализ факторов, определяющих точность решения поставленной задачи: количество и взаимное расположение точек, используемых при формировании набора данных, объем обучающей выборки, начальные значения весовых коэффициентов и смещений, задаваемые при инициализации процесса обучения, вид целевой функции, известной как функция потерь, и другие.

Отражено, что наиболее существенным влиянием на точность локализации внешнего воздействия обладает конфигурация системы мониторинга, используемая для измерения параметров НДС. Так, при увеличении количества измеряемых точек с 2 до 4 ед. средняя ошибка определения положения нагрузки снижается на 60% – 95% (в зависимости от их взаимного расположения). Минимальная точность была получена при использовании конфигурации из 2-х измеряемых точек, расположенных по диагонали исследуемой пластины, что подтверждает один из результатов работы [3].

Однако даже в случае минимального значения средней ошибки имеют место области в окрестности измеряемых точек, в пределах которых точность решения поставленной задачи существенно снижается (рис. 3).

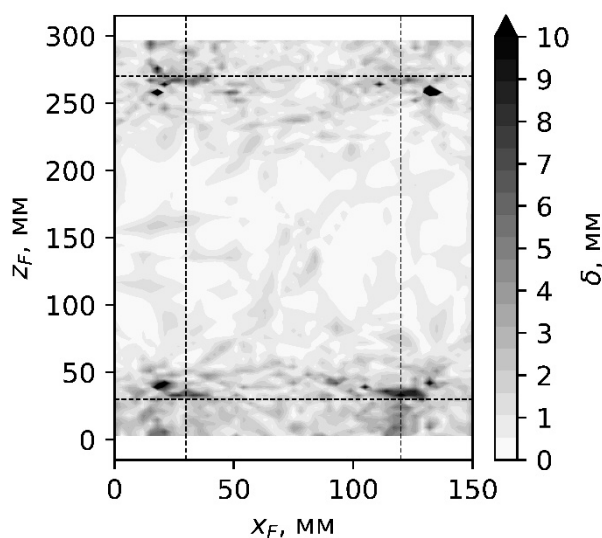


Рис. 3. – Распределение ошибки локализации нагрузки δ в зависимости от ее точного положения. Пересечениями пунктирных линий отмечены положения 4-х измеряемых точек, используемых при формировании набора данных

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.3.2.

Литература

1. Jayawickrema U.M.N., Herath H.M.C.M., Hettiarachchi N.K., Sooriyaarachchi H.P., Epaarachchi J.A. Fibre-optic sensor and deep learning-based structural health monitoring systems for civil structures: A review // Measurement. 2022. Vol. 199. 111543. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111543>
2. Шолле Ф. Глубокое обучения на Python. СПб.: Питер, 2018. 400 с.
3. Khosrowpour E., Hematiyan M.R. Distributed load identification for hyperelastic plates using gradient-based and machine learning methods // Acta Mechanica. 2024. Vol. 235, No. 5. P. 3271–3291. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-03881-7>

ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРЕДСКАЗЫВАТЬ ПАРАМЕТРЫ ДЕФОРМАЦИИ БАЛКИ ПОД ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ

Степанов Р.А.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

В работе рассматривается процесс температурной деформации консольной балки, находящейся под воздействием неравномерных тепловых потоков на ее поверхности. Температура левой и нижней граней поддерживается постоянной, на верхней границе задан тепловой поток, а правый конец считается теплоизолированным. Вследствие неравномерного распределения температуры в теле балки возникают температурные градиенты, которые вызывают появление тепловых напряжений и приводят к изгибу конструкции. Целью работы является разработка и обучение искусственной нейронной сети, способной по заданным параметрам исходной физической задачи предсказывать основные характеристики температурной деформации консольной балки. В качестве входных данных используются геометрические и физические параметры балки (толщина, ширина, коэффициенты теплопроводности, температурного расширения, модуль Юнга, коэффициент Пуассона), а также величина теплового потока.

Для решения задачи используется полносвязанная нейронная сеть с двумя скрытыми слоями и функцией активации ReLU. Обучающая выборка формируется на основе численного решения задачи методом конечных элементов. Процесс моделирования включает два этапа: на первом этапе решается нестационарная тепловая задача, в результате чего определяется распределение температуры в теле балки (пример температурного поля приведён на рис. 1); на втором этапе вычисляются поля горизонтальных и вертикальных перемещений, а также величины изгиба и деформации конструкции (рис. 2). Полученные данные используются для обучения нейронной сети для решения задачи регрессии, где целевыми параметрами являются максимальные значения растяжения, сжатия и отклонения балки от исходного положения.

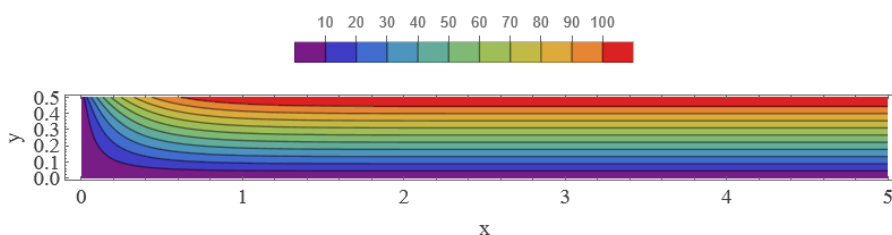


Рис. 1. – Распределение температуры

Современные подходы к ускоренному анализу термоупругих задач активно используют нейросетевые суррогаты и физически-информированные сети (PINN). Для сопряжённых термомеханических систем предложены PINN-методы в смешанной постановке, обеспечивающие высокую точность на гетерогенных областях и при жёстких граничных условиях [1]. Нейросети используются как суррогаты расчёта прогибов балок по параметрам нагружения и материала (обычно без тепловой компоненты), демонстрируя применимость «параметры → деформация/прогиб» в задачах балочной механики [2]. Кроме того, имеются исследования, где глубокие сети выступают быстрыми и точными

заменителями конечно-элементного анализа для предсказания полей напряжений в твёрдом теле [3]. На этом фоне новизна настоящей работы состоит в предсказании ключевых характеристик термической деформации консольной балки (максимальные растяжение/сжатие и отклонение) напрямую по физико-геометрическим параметрам и условиям теплового нагружения, с обучением на FEM-данных.

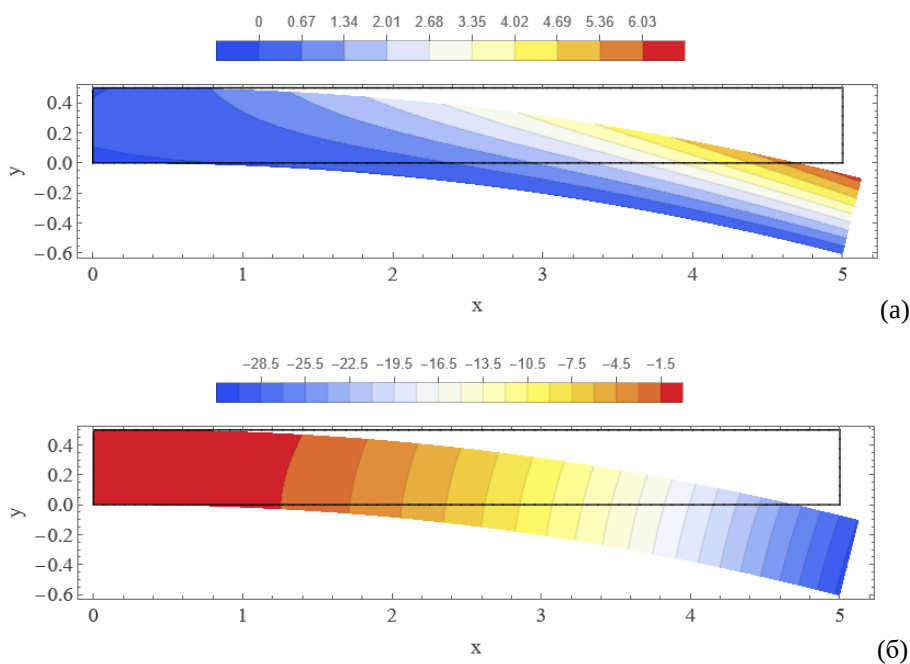


Рис. 2. – Распределения деформаций: вдоль оси x (а), вдоль оси y (б)

Обученная нейронная сеть продемонстрировала высокую точность предсказания параметров температурной деформации консольной балки по исходным физическим характеристикам. Максимальное отклонение предсказанных значений от результатов численного моделирования не превышает нескольких процентов. Полученные результаты демонстрируют возможность использования нейросетевого подхода для быстрой оценки термоупругих деформаций без необходимости проведения трудоёмких вычислений методом конечных элементов. Разработанная модель может быть расширена для анализа конструкций со сложной геометрией и нестационарными тепловыми воздействиями.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.3.2.

Литература

1. Harandi A.R., Moeineddin A., Kaliske M., Reese S., Kästner M. Mixed formulation of physics-informed neural networks for thermo-mechanically coupled systems and heterogeneous domains // Int. J. Numer. Meth. Eng. 2024. Vol. 125. <https://doi.org/10.1002/nme.7388>
2. Mishra M., Agarwal A., Maity D. Neural-network-based approach to predict the deflection of plain, steel-reinforced, and bamboo-reinforced concrete beams from experimental data // SN Applied Sciences. 2019. Vol. 1, Art. 584. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0622-1>
3. Liang L., Liu M., Martin C., Sun W. A deep learning approach to estimate stress distribution: a fast and accurate surrogate of finite-element analysis // J. R. Soc. Interface. 2018. Vol. 15. Art. 20170844. <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0844>

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Конюхов В.А., Каменских А.О.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Для современных инженерных конструкций предъявляются повышенные требования к надежности и долговечности. Одним из ключевых направлений повышения эксплуатационной безопасности является развитие технологий непрерывного мониторинга механического состояния конструкций на основе встроенных сенсорных систем. Перспективным инструментом для данной задачи являются волоконно-оптические датчики (ВОД), которые обладают рядом уникальных преимуществ: минимальные размеры, невосприимчивость к электромагнитным помехам, возможность мультиплексирования большого числа датчиков на одном волокне.

ВОД на основе рэлеевского рассеяния позволяют получать информацию о распределении деформаций вдоль всей длины оптического волокна при минимальном вмешательстве в структуру материала. Среди современных методов распределенных измерений оптическая рефлектометрия в частотной области (Optical Frequency Domain reflectometry, OFDR) выделяется благодаря высокому пространственному разрешению и чувствительности к деформациям. Тем не менее, широкое практическое применение распределенных систем измерения на основе ВОД затруднено из-за отсутствия удобных средств для пространственной интерпретации и визуализации данных на геометрической модели объекта мониторинга.

В данной работе представлена концепция интеллектуальной системы мониторинга механического состояния пластин и оболочек, объединяющая измерения деформаций с помощью ВОД, потоковую обработку данных и визуализацию в единой среде.

Разрабатываемая интеллектуальная система мониторинга состоит из четырех взаимосвязанных подсистем:

1. Измерительная система для регистрации деформаций с помощью ВОД. В предлагаемой реализации измерительная система основана на динамическом рефлектометре OSI-D, который позволяет проводить распределенные измерения деформаций на оптическом волокне длиной до 80 м с максимальной частотой опроса 100 Гц.

2. Подсистема потоковой передачи данных от измерительного устройства на терминальный ПК системы мониторинга. Для интеграции рефлектометра с программным обеспечением пользователя реализована система, которая обеспечивает прием данных в реальном времени по протоколу TCP/IP. Поток измерений представляет собой последовательность массивов деформации $\epsilon(s)$ по координате вдоль длины волокна s . В рамках рассматриваемой системы выполняется выделение отдельных секций волокна на основе заданных интервалов, соответствующих конкретным участкам объекта мониторинга, на которых расположено оптическое волокно.

3. Подсистема пространственной реконструкции данных. Измеренные значения $\epsilon(s)$ преобразуются в набор пространственных точек на объекте мониторинга. В частности, для пластины это набор декартовых координат и значений деформаций. На основе этих точек

восстанавливается двумерное поле деформаций $\varepsilon(x, y)$.

4. Подсистема визуализации и анализа, позволяющая в режиме реального времени отображать поле деформаций на объекте мониторинга.

В качестве демонстрационного объекта использовалась пластина размером 300×300 мм, изготовленная с помощью 3D-печати методом послойного наплавления из дискретно-армированного короткими углеродными волокнами термопластичного филамента. Оптическое волокно для распределенного измерения деформаций размещено в рабочей зоне на поверхности пластины и внедрено в структуру материала на этапе изготовления образца.

Разработанный демонстратор подтвердил возможность непрерывной регистрации и передачи распределенных измерений деформации в потоковом режиме, сопоставления одномерных распределений с геометрической моделью конструкции, восстановления и визуализации двумерных полей деформаций в реальном времени.

В отличие от традиционных методов мониторинга, основанных на точечных тензодатчиках, предложенная архитектура обеспечивает непрерывное поле данных с высоким пространственным разрешением и может быть масштабирована для оболочек сложной формы.

Предложенная система объединяет возможности распределённых волоконно-оптических измерений и алгоритмов пространственной реконструкции, обеспечивая отображение полей деформаций в реальном времени. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения разработанной архитектуры для построения интеллектуальных систем диагностики и прогнозирования механического состояния элементов конструкций.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.3.3.

ПОСТРОЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В МАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПОЛЯХ

Роговой А.А., Столбова О.С.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФЦ УрО РАН

В работе на примере сплава Гейслера Ni-Mn-Ga, относящегося к классу функциональных (умных) материалов, предложен микроструктурный подход к моделированию поведения мартенситного состояния таких ферромагнитных материалов с памятью формы в магнитных и силовых полях. Мартенситное состояние (низкотемпературная фаза) возникает из аустенитного состояния (высокотемпературная фаза) в результате фазового перехода первого рода при охлаждении материала. При этом меняется его кристаллическая структура: кристалл, имеющий кубическую форму в аустенитном состоянии, преобразуется в кристалл, имеющий тетрагональную форму в мартенситном состоянии. Такой процесс (существенное изменение формы кристалла) должен сопровождаться возникновением больших напряжений в материале. Но, в соответствии с принципом Ле Шателье-Брауна, в материале инициируются процессы, направленные на компенсацию результатов этого фазового перехода: сплав образует двойниковую структуру, минимизирующую возникающие внутренние напряжения (в нем формируются только незначительные объемные деформации). В каждой из мартенситных пластин, образующих двойник, короткие оси тетрагональных ячеек имеют одинаковые направления, но различаются на 90° в двух разных элементах двойника: в сплаве одновременно и неразрывно существуют деформационный и структурный двойники [1]. Деформационный двойник, являющийся следствием выполнения условия совместности деформаций Адамара, возникает в результате простого сдвига, приводящего к макроскопическому излому мартенситной пластины, в то время как структурный двойник образован тетрагональными ячейками кристаллов, чьи оси легкого намагничивания взаимно повернуты на 90° . Направления этих осей в мартенситных пластинах определяют анизотропию магнитных и механических свойств этих пластин, а расположение этих пластин в материале определяет анизотропию этих свойств в материале. Приложение внешнего напряжения и/или магнитного поля в этом состоянии вызывает традиционную упругую деформацию и небольшое магнитострикционное воздействие, соответствующее действующим силам и магнитному полю, и дополняется процессом раздвойникового (или, наоборот, образованием двойника), который сопровождается значительной деформацией в 6-10 раз выше упругой.

Процесс двойникового (раздвойникового) — это процесс изменения в пространстве ориентации короткой оси тетрагональной ячейки. Он происходит при достижении касательным усилием, возникающем на поверхности скольжения в кристалле в определенном направлении, определенного значения (и то, и другое зависят от конкретного материала). Чтобы определить это касательное усилие необходимо решить магнитоупругую задачу о действии на конкретное изделие из сплава Гейслера механических сил и сил, инициируемых внешним магнитным полем. К последним относятся пондеромоторная сила и магнитный момент, возникающие в объеме материала, а также нормальная и касательная силы, действующие на поверхности тела [2].

Для расчета магнитных полей, определяющих эти магнитные силы и моменты, предложен новый подход к моделированию магнитного поведения сплава Гейслера. Вместо решения полного уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта, описывающего динамику прецессии вектора намагниченности, используется уравнение, определяющее только его конечное, результирующее направление [3, 4]. Этого достаточно для решения магнитомеханических задач, где важен конечный результат воздействия поля, а не переходный процесс, и это позволяет значительно снизить вычислительные затраты. Поле размагничивания, зависящее от геометрии образца, рассчитывается через скалярный магнитный потенциал на основе уравнений магнитостатики, что позволяет учесть сложную и неоднородную пространственную структуру образца. Дифференциальным уравнениям, описывающим поведение ферросплава во внешнем магнитном поле, поставлены в соответствие вариационные уравнения, что позволило на порядок снизить требования к гладкости искомого решения. Разработан итерационный алгоритм для последовательного уточнения намагниченности и магнитного потенциала, обеспечивающий эффективную сходимость при решении задач.

Чтобы рассчитать определяющую процесс двойникования – раздвойникования касательную силу, действующую на определенной поверхности тетрагональных ячеек и инициируемую силовыми и магнитными полями, в статье [5] было построено определяющее уравнение, описывающее механическое поведение ферромагнитного сплава Гейслера в таких полях. Тензор напряжений представлен в виде суммы симметричной и кососимметричной частей. Такая структура тензора напряжений является следствием частного случая моментной теории упругости, когда в объеме материала действует магнитный момент, но моментного напряжения нет, потому что нет поверхностного магнитного момента. В этом случае тензор напряжений – асимметричный тензор, кососимметричная часть которого зависит только от магнитного поля, параметры которого определяются из решения магнитной задачи. Тензор четвертого ранга упругих свойств анизотропного материала, определяющий симметричную часть тензора напряжений, построен на основе симметрии тетрагональной ячейки ферромагнитного сплава Ni-Mn-Ga.

Построенное определяющее уравнение было использовано для описания процесса одноосного сжатия образца из сплава с памятью формы, имеющего экспериментальное обеспечение. Это уравнение было представлено в одном и том же базисе для двух случаев анизотропии, в одном из которых короткая ось тетрагонального кристалла была направлена по одному вектору базиса, а в другом – по второму (см. [5]). Вначале короткие оси тетрагональных ячеек всех кристаллов располагались перпендикулярно оси образца, и процесс сжатия рассчитывался, используя одно из уравнений, соответствующее этому случаю (назовем его первым уравнением). Возникали малые упругие деформации. При дальнейшем увеличении нагрузки происходил размытый структурный переход: в кристаллах, где касательные усилия на поверхностях скольжения достигали критической величины, короткие оси тетрагональных ячеек скачком поворачивались в направлении оси сжатия, вызывая значительные структурные деформации (обозначим относительное количество таких кристаллов q). Короткие оси другой части кристаллов, в которых касательные усилия на поверхностях скольжения не достигали критической величины, не меняют своего направления (их количество будет $1 - q$). Аналогичный процесс реориентации коротких осей кристаллов проиллюстрирован на рис. 10 в работе [5], но для другой задачи). Процесс сжатия, который в дополнение к большим структурным деформациям, возникшим в результате переориентации кристаллических ячеек, вызывает только малые упругие деформации, рассчитывался, суммируя оба уравнения: первое пропорционально величине $(1 - q)$, второе – пропорционально величине q . На

заключительном этапе происходила упругая разгрузка полностью переориентированной структуры ($q = 1$), в которой короткие оси всех ячеек стали параллельными направлению сжатия.

Размытый характер перехода отражает статистическое распределение количества переориентированных кристаллов (величины q) в зависимости от критических касательных напряжений в конкретном материале. Хорошего совпадения расчетных результатов с экспериментальными данными удалось достичь для экспоненциального закона распределения.

В настоящей работе, опираясь на экспериментальные данные, построена микроструктурная модель процесса осадки образца из сплава с памятью формы. В дальнейшем планируется учесть в этой модели действие внешнего магнитного поля, приложенного перпендикулярно направлению осадки, и сравнить полученные результаты с известными экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.3.4.

Литература

1. Rogovoy A.A. On deformation and structural twins in the shape memory alloys // *Mechanics of Materials*. 2025. Vol. 208. 105393. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2025.105393>.
2. Rogovoy A.A. Forces initiated by the magnetic field on the body surface (a new approach) // *Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.* 2025. Vol. 46. P.1715–1728. <https://doi.org/10.1007/s10483-025-3298-9>.
3. Rogovoy A.A., Stolbova O.S. The relation for determining the resulting direction of the magnetization vector obtained from the Landau-Lifshitz-Gilbert equation // *Physics of Metals and Metallography*. 2025. Vol. 126, No. 8. (принято к опубликованию)
4. Роговой А.А., Столбова О.С. Новый подход к моделированию магнитного поведения сплава Гейслера // *Физика металлов и металловедение*. (представлена в журнал)
5. 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 // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28 May 2024. 21 pp. (online); 2025. Vol. 32, No. 5. P.794–814 (print) <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2355627>.

СИНТЕЗ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ СИЛОКСАНОВЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ-НОСИТЕЛЕЙ, ОБЛАДАЮЩИХ НИЗКОЙ (ДО МИНУС 60 °С) ТЕМПЕРАТУРОЙ ЗАМЕРЗАНИЯ.

Лебедев А.В., Лысенко С.Н.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

«Институт технической химии УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН

В 60-ых годах прошлого века были синтезированы коллоидные растворы магнетиков, за которыми в дальнейшем закрепилось название магнитные жидкости [1]. Сочетая подвижность классической ньютоновской жидкости и сильные магнитные свойства ферромагнетика, магнитные жидкости оказались перспективным объектом научных исследований и конструкторских разработок. В частности, с помощью магнитной жидкости решается техническая проблема поддержания надежного акустического контакта между датчиком и изделием в приборах ультразвуковой дефектоскопии. При стационарном положении датчика никаких проблем не возникает. Капля консистентной смазки обеспечивает хороший контакт. Но если датчик находится в движении относительно объекта контроля, то поддержание акустического контакта превращается в серьезную проблему. Тогда на выручку приходит магнитная жидкость. Капля магнитной жидкости между датчиком и изделием, удерживаемая с помощью магнитного поля, обеспечит надежный акустический контакт при движении датчика.

При обычных температурах для ультразвукового контакта вполне пригодна стандартная магнитная жидкость, представляющая собой дисперсию частиц магнетита в керосине, стабилизированную олеиновой кислотой. Сложности возникают при работе в условиях низких температур. Стандартная жидкость теряет подвижность при охлаждении до -60 °С [2]. Температура отвердевания не зависит от базовой среды магнитной жидкости. Потеря подвижности обусловлена кристаллизацией оболочек стабилизатора, покрывающих магнитные частицы. Таким образом, основное направление работ по синтезу низкотемпературных магнитных жидкостей должно состоять в поисках стабилизатора, сохраняющего работоспособность при низких температурах.

В работе [3] были исследованы низкотемпературные свойства магнитных жидкостей, стабилизированных полипропилен гликолем. Оказалось, что при диспергировании таких частиц в спиртах они сохраняют подвижность вплоть до -115 °С. Казалось бы, проблема успешно решена. Но не тут то было. Вязкость такой жидкости очень быстро нарастает при понижении температуры, и для целей улучшения акустического контакта жидкость становится малоприменимой.

Наращение вязкости у жидкости, стабилизированной полипропилен гликолем в спиртах, происходит по двум причинам: вследствие нарастания вязкости базовой среды (спиртов) и влияния на вязкость большой толщины стабилизирующих оболочек. Быстрое нарастание вязкости спиртов с понижением температуры хорошо известно и может быть устранено только переходом на другую базовую жидкость. В частности, были получены обнадеживающие результаты на образцах жидкости, стабилизированной полипропилен гликолем в аллилхлориде. При температуре -60 °С вязкость жидкости составляла порядка 10 сПз, что является вполне приемлемой величиной. В качестве дальнейших шагов предполагается выполнить эксперименты с магнитными жидкостями на базе низкотемпературирующих кремний-органических сред. Например, на базе тетраэтоксисилана.

Другое направление работ состоит в оптимизации состава стабилизатора. Изначально использованный нами полипропилен гликоль согласно паспорту производителя имеет молекулярную массу 400. Более подробный анализ показал, что на самом деле это смесь изомеров с массами от 200 до 600. То есть, реально в составе стабилизатора присутствует тяжелая фракция, повышающая его нижнюю рабочую температуру. Решением проблемы является синтез монодисперсного низкомолекулярного стабилизатора на основе олигомера пропиленгликоля мономолекулярного состава.

В качестве исходных реагентов были выбраны три-оксипропилен метиловый эфир и три-оксипропилен бутиловый эфир. Указанные олигомеры имеют в своем составе гидроксильную группу. Поэтому на их основе легко синтезировать ПАВ, присоединив молекулу янтарного ангидрида, получая таким образом карбоксильную группу для присоединения молекул трипропилен гликоля к поверхности магнитных частиц [3]. Сами магнитные частицы проще всего синтезировать на основе магнетита путем химического осаждения солей железа [4 - 6].

Отдельную проблему представляет теперь исследование устойчивости частиц с вновь синтезированными стабилизаторами в различных средах при низких температурах. Это будут задачи на ближайшее время.

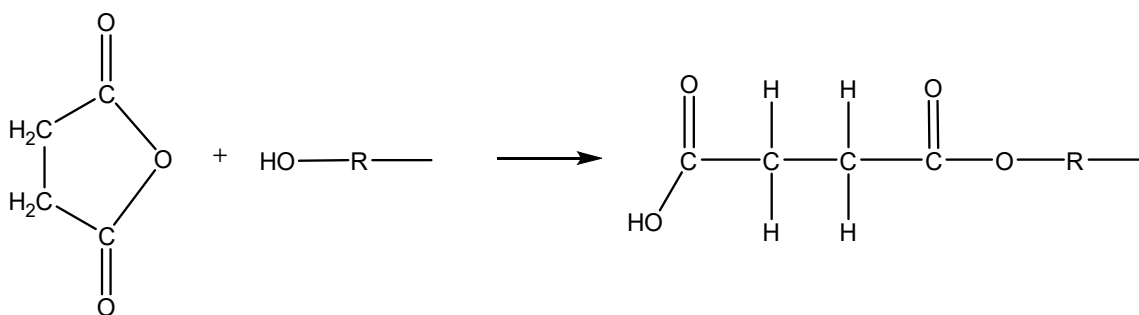


Рис. 1. – Схема химической реакции создания концевой карбоксильной группы на месте гидроксильной группы у олигомера полипропилен гликоля.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.4.1.

Литература

1. Шлиомис М. И. Магнитные жидкости // Успехи Физических Наук. 1974. Т. 112. Вып. 3. С.435 – 458.
2. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V. Low-temperature susceptibility of concentrated magnetic fluids // J. Chem. Phys. 2004. V. 121. N. 11. P. 5455.
3. Lebedev A.V., Lysenko S.N. Magnetic fluids stabilized by polypropylene glycol // JMMM. 2011. V. 323. P. 1198.
4. Elmore W.C. On preparation of the magnetite high dispersed. // Phys. Rev. 1938. v. 54. pp. 309 - 310.
5. Gribanov N.M., Bibik E.E., Buzunov O.V., Naumov V.N. Physico-chemical regularities of obtaining highly dispersed magnetite by the method of chemical condensation. // Journal on Magnetism and Magnetic Materials, 1990, vol. 85, pp. 7-10.
6. Bibik, E.E. and Lavrov, I.S. USSR Inventor's Certificate no. 457666, 1975.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ МЯГКИХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНКРЕМЕНТАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Иванов А.С., Лебедев А.В., Косков М.А.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Мягкие магнитные материалы представляют собой широкий класс дисперсий магнитных частиц в различных немагнитных средах, например, магнитные жидкости (МЖ) представляют собой коллоидные растворы магнитных наночастиц (МНЧ) в обычных жидкостях-носителях [1], а магнитоактивные эластомеры – это дисперсии МНЧ в упругих полимерах [2]. Магнитные свойства любого материала характеризуются кривой намагничивания, представляющей собой зависимость намагниченности M от напряженности магнитного поля H . В случае магнитных жидкостей кривая намагничивания дает информацию о дисперсном составе МНЧ благодаря процедуре магнитогранулометрического анализа. Эта информация позволяет контролировать основные физические свойства МЖ, в том числе склонность к агрегированию МНЧ при низких температурах во внешних магнитных полях, а также зависимость спектральных характеристик МЖ. Последнее явление важно в контексте того, что измерение толщины плёнки МЖ, остающейся на поверхности исследуемой детали в процессе ультразвуковой дефектоскопии, возможно осуществить бесконтактным методом, измеряя поглощение света в МЖ. Однако даже при одинаковой объемной доле дисперсной фазы разные образцы МЖ поглощают по-разному (различно даже невооруженным глазом), так как спектр поглощения существенно зависит от дисперсного состава МНЧ. Таким образом, разработка и обоснование методов магнитных измерений играет важную роль в аттестации всех магнитных материалов, и МЖ в частности.

Основанием работы послужило то обстоятельство, что классические методы измерения намагниченности: вибрационный магнитометр (VSM) или баллистический метод, - не подходят для работы с мягкими магнитными материалами. Чем мягче среда, тем серьезнее проблема, вызванная механическим движением МНЧ относительно окружающей её матрицы. Эти эффекты наиболее ярко выражены в феррожидкостях. Более того, во внешнем магнитном поле происходит агрегация МНЧ в объекты микронного размера. Метод VSM подразумевает механическую вибрацию образца. Это не представляет никаких проблем в случае твердых магнетиков, таких как кристаллы, аморфные твердые тела, сыпучие (порошкообразные) материалы, плотно упакованные в контейнер. Однако в полимерной, жидкой или гелевой матрице из-за сил инерции твердые МНЧ и (что более важно) их кластеры и агрегаты, совершают колебания не в фазе с основным. Эта разность фаз приводит к значительным систематическим ошибкам VSM-измерений [3].

Для устранения указанных недостатков нами был предложен альтернативный метод измерения кривой намагничивания [4], названный инкрементально-дифференциальным в силу заложенного в него алгоритма действий. Суть метода заключается в измерении дифференциальной магнитной восприимчивости dM/dH при пошаговом увеличении (инкременте) поля H от нуля до значений, в которых намагниченность магнитной жидкости достигает насыщения, и дальнейшего интегрирования полученной экспериментальной зависимости. При этом интегрирование исходных данных положительно сказывается на уменьшении погрешности получаемых

данных. Схема основной части экспериментальной установки (измерительная и магнитная компоненты) показаны на Рис. 1.

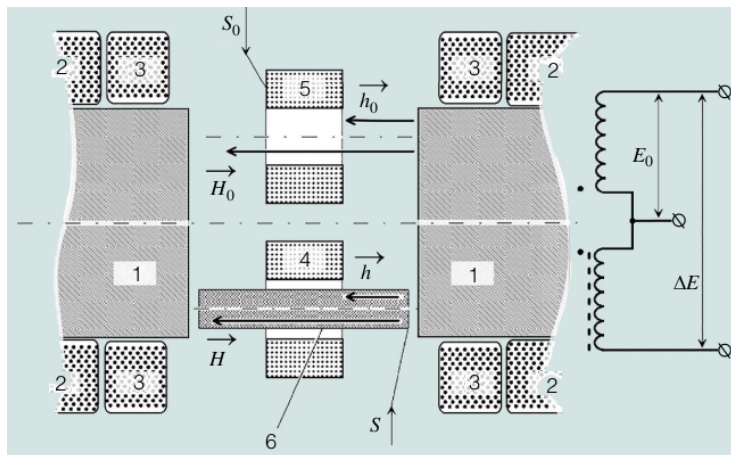


Рис. 1. - Расположение измерительной ячейки (слева) и компенсационная электрическая схема (справа): 1 - полюсы электромагнита, 2 - намагничивающие катушки (питаются регулируемым источником постоянного тока), 3 - модулирующие катушки (подключены к генератору низкочастотных сигналов), 4 и 5 - измерительная и компенсационная катушки, 6 - испытуемый образец.

Кривые намагничивания одних и тех же образцов, измеренные новым методом, сравнивались с таковыми, измеренными на вибрационных магнитометрах различного производства и установках, реализующих баллистический метод (с применением микровеберметров). Продемонстрировано преимущество нового метода. Технические подробности реализации, обоснования и апробации метода изложены в работе [4].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.4.2.

Литература

1. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // Усп. Физ. Наук. 1974. Т. 112, № 6. с. 427-458. DOI: 10.3367/UFNr.0112.197403b.0427.
2. Райхер Ю.Л., Ваганов М.В. Магнитоактивные эластомеры: частицы ферромагнетика в условиях ограниченной свободы // Вестн. ПФИЦ. 2021. Вып. 1. с. 6-18. DOI: [10.7242/2658-705X/2021.1.1](https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.1.1).
3. Lebedev A.V. On the unsuitability of a vibrating sample magnetometer for measuring the magnetization curves of magnetic fluids // Bull. Perm Uni. Phys. 2022 №. 2, p. 20-25. DOI: [10.17072/1994-3598-2022-2-20-25](https://doi.org/10.17072/1994-3598-2022-2-20-25).
4. Lebedev A.V., Koskov M.A., Ivanov A.S. Experimental technique of soft magnetic materials magnetization curve measurement by incremental-differential method // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2025, vol. 28, no. 5, p. 49-55, DOI: 10.1109/MIM.2025.11107352.

РАСХОД МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Крыласова О.С., Голдобин Д.С., Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Уникальное преимущество магнитной жидкости (МЖ) в качестве контактной среды при ультразвуковом контроле – в том, что такой контакт прочно удерживается на датчике дефектоскопа, оснащённом магнитной системой. Эта прочность обеспечивается подходящим выбором энергетического произведения постоянного магнита, встроенного в датчик. Действительно, МЖ не может вытечь из жидкостного контакта под действием гравитации – как это происходит с любой немагнитной жидкостью – поскольку создаваемая датчиком магнитная сила намного превосходит силу тяжести. Тем самым, обеспечивается стабильность процесса контроля. Схема процесса представлена на рисунке 1.

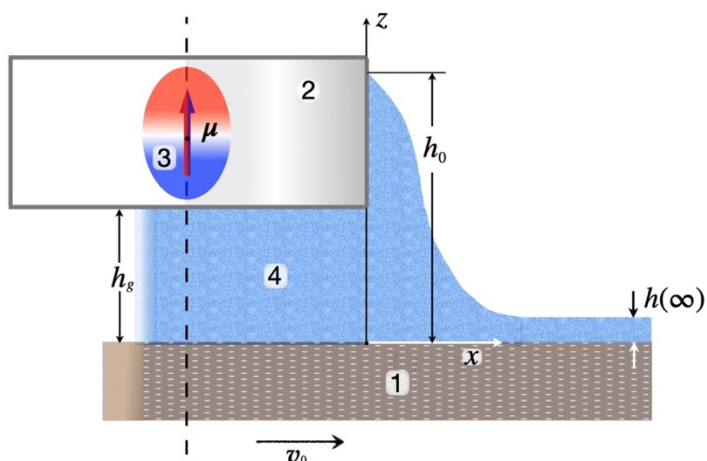


Рисунок 1. Схематическое представление процесса ультразвукового сканирования с использованием МЖ в системе отсчёта, связанной с датчиком; 1 – сканируемая поверхность, 2 – головка дефектоскопа с пьезопреобразователем, 3 – постоянный магнит, 4 – магнитожидкостный акустический контакт. Представлено в системе отсчёта, связанной с датчиком.

В большинстве случаев МЖ является смачивающей по отношению к контролируемой поверхности. Это означает, что движение контакта сопровождается потерями МЖ: хотя основной объём, прочно удерживается магнитом датчика, некоторая часть жидкости остаётся на контролируемой поверхности в виде тонкой остаточной плёнки. Величина этого расхода является важным технологическим параметром описанного процесса. Действительно, ею определяется темп пополнения контакта магнитной жидкостью в стационарном процессе сканирования. Поскольку МЖ – высокотехнологичный продукт, очевидно: что коммерческие характеристики магнитожидкостного контакта тем лучше, чем ниже расход МЖ и, таким образом, минимизация её потерь – это важная и актуальная задача для обсуждаемого раздела КНП.

Первый год проекта заняла разработка общей схемы расчёта и решение тестовой задачи. В качестве прототипа была выбрана концепция, предложенная Л.Д. Ландау и В.Г. Левичем [1], где профиль плёнки, вытягиваемой из резервуара, представляется в виде

комбинации двух сопряжённых зон. В дальней зоне плёнка течёт, слабо меняя толщину, и её движение описывается уравнениями пограничного слоя. В ближней зоне (рядом с границей датчика) гидродинамика несущественна, а главным фактором является форма мениска, то есть «тыльной» границы жидкости, удерживаемой в области акустического контакта. Форму этой границы можно считать близкой к той, какую она имела бы в статическом случае, и находить из этих соображений.

В отчётном году решалась задача о расходе именно магнитной жидкости. Принципиальное отличие рассматриваемой задачи от классической в том, что в случае МЖ форму мениска задаёт не капиллярность, а магнитная сила, которая действует и в объёме МЖ, и на её свободной поверхности. Действительно, если в классическом случае радиус мениска в ближней зоне имеет порядок капиллярной длины $l = \sqrt{2\sigma/\rho g}$, где σ – поверхностное натяжение жидкости, ρ – её плотность, а g – ускорение свободного падения, то в случае магнитной жидкости оценкой характерного радиуса является величина $l_m \sim \sigma/M^2$, где M – намагниченность МЖ. По-другому, l_m указывает порядок расстояния от источника магнитного поля, на котором магнитные и капиллярные силы становятся соизмеримыми и происходит фактическое формирование остаточной плёнки.

В случае не слишком сильного магнитного поля $\mathbf{H}$ можно принять, что имеется линейная связь $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$, задаваемую через магнитную восприимчивость χ . Тогда оценке (1) можно придать вид $l_m \sim \sigma/(\chi H)^2$, и это сразу указывает на её неполноту. В самом деле, поле магнита: встроенного в датчик, пространственно неоднородно, его величина зависит от расстояния, на котором применяется оценка.

Корректный учёт магнитного, капиллярного и гравитационного факторов приводит к нелинейному дифференциальному уравнению второго порядка

$$\rho g h(x) - \sigma \frac{d^2 h}{dx^2} \left[1 + \left(\frac{dh}{dx} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} = \frac{1}{2} \chi \left[(H^{(i)})^2 + (H_n^{(i)})^2 \right], \quad (2)$$

где $h(x)$ – профиль поверхности МЖ за датчиком, $|H^{(i)}|$ – модуль магнитного поля на профиле $h(x)$, а $H_n^{(i)}$ – нормальная к профилю $h(x)$ компонента этого поля. Одно из граничных условий, налагаемых на уравнение (2), имеет интегральную форму – это суммарный объём МЖ за датчиком. Сложный вид уравнения (2) не позволяет решить его аналитически, здесь возможен только численный расчёт.

В докладе представлены метод и результаты решения уравнения (2). Сшивку этого решения с профилем плёнки в дальней зоне даёт выражение для расхода МЖ при заданной скорости сканирования. Получены оценки для сочетаний материальных параметров, соответствующих двум типам МЖ: обычные типа «магнетит в керосине» и низкотемпературные – на основе 50% водных растворов этилен- и пропиленгликоля, описанные в работе [2].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.4.3.

Литература

1. Ландау Л.Д., Левич В.Г. Dragging of a liquid by a moving plate // Acta Physicochemica USSR. 1942. V. 17. P. 42–51.
2. Лебедев А.В., Лысенко С.Н. Низкотемпературные магнитные жидкости на основе спирта и растворов солей, стабилизированные двойным слоем, содержащим неионный сурфактант TWEEN 20 // Коллоидный журнал. 2025. DOI: 10.1134/S1061933X25600587

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТОВ, СВЯЗУЮЩИМ КОТОРЫХ ЯВЛЯЕТСЯ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫЙ КАУЧУК

Беляев А.Ю., Мохирева К.А., Морозов И.А., Изюмов Р.И.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

В продолжение работы прошлого года, рассматривается механическое поведение эластомерных нанокомпозитов в экспериментах с вложенными циклами и циклическими испытаниями с нарастающей амплитудой деформаций (рис.1). Объектом исследования этого года были полимерные нанокомпозиты с матрицей на основе бутадиен-нитрильного каучука, который обеспечивает лучшую адгезию с наполнителем. В центре внимания было исследование влияния многостенных нанотрубок на свойства материала, как наиболее активного наполнителя эластомеров. Кроме них использовался в рецептуре технический углерод и многослойный графен, полученный по СВС технологии.

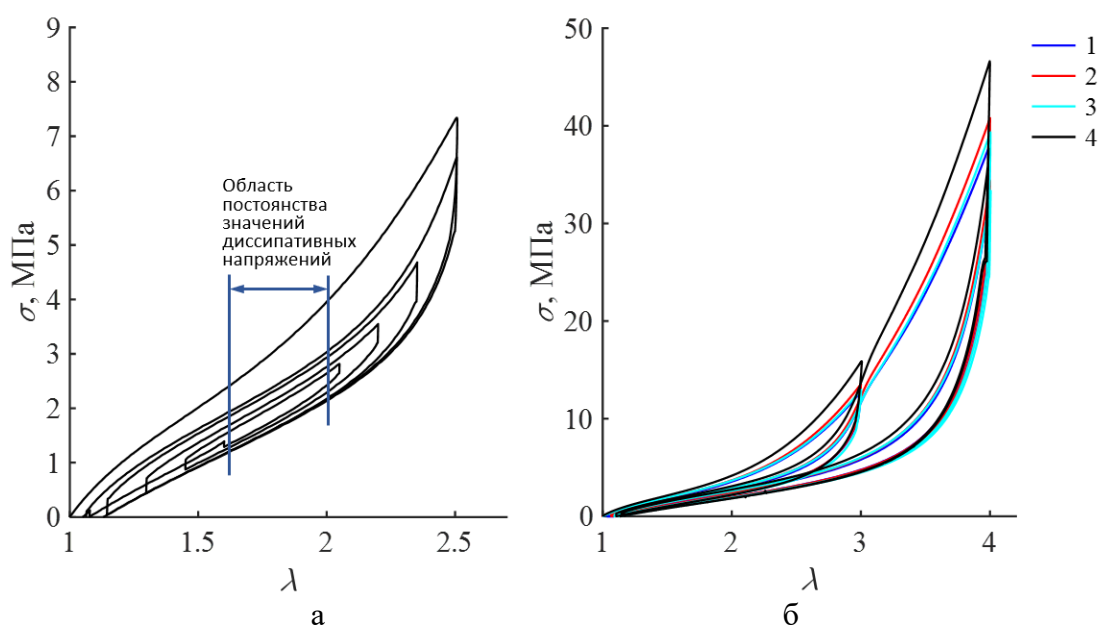


Рисунок 1 — Зависимость напряжений от деформаций: а — в эксперименте со вложенными циклами; б — в эксперименте с нарастающей амплитудой

Приведенные на рисунке 1 кривые получены на образцах, содержащих технический углерод с массовой долей 40%. Эксперимент со вложенными циклами выполнялся с разными скоростями деформирования и с остановками на 10 минут при смене направления движения захватов. Снова обнаружены участки установившегося поведения материала (рис. 1, а). Эксперименты с нарастающей амплитудой циклов при очень больших деформациях и остановками на 10 минут при смене направления движения захватов (рис. 1, б) показали, что в размягченном материале кривые связи напряжения с деформацией не зависят от скорости движения захватов. Цифрами на рисунке указаны кривые деформирования со скоростями: 1 — 10 % / мин; 2 — 25 % / мин; 3 — 100 % / мин; 4 — 400 % / мин. Это должно говорить о том, что в процессах, отраженных

на рисунке (а), ведущую роль играют вязкоупругие свойства материала. В процессах, иллюстрацией которых является рисунок (б), диссипация связана с открытием повреждений при растяжении материала, и их закрытием при снятии нагрузки.

В выполненной работе кроме использования одновременно двух наполнителей, исследовано применение гибридных наполнителей. Такой материал можно рассматривать как неоднородную среду, состоящую из композитного связующего с композитными включениями. Композитные включения получены изготовлением по СВС технологии малослойных графенов из биополимеров в окружении нанотрубок или в окружении частиц технического углерода. Потом гибридные частицы были использованы как наполнитель для связующего, содержащего технический углерод.

Примеры сравнения композитов с двумя наполнителями и аналогичными композитами с гибридными наполнителями показаны на рисунках 2 и 3. Гибридными материалами выступали малослойные графены с нанотрубками (рисунки а) и малослойные графены и технический углерод (рисунки б). В материалах с нанотрубками наблюдается более высокое усиление эластомера наполнителем и выше диссипативные потери. При этом имеется отличие в свойствах материала с двумя наполнителями от материала с гибридным наполнителем. Объяснить это можно отличием в структуре материалов (рисунок 4). У композитов разное распределение частиц по размерам.

Установлено, что в материалах с техническим углеродом и графеном в обычном и гибридном варианте, нет существенных отличий. Но на практике использование малослойных графенов может давать ряд преимуществ. Производство их по СВС технологии является экологически чистым. Не требуется серьезная фильтрация для предотвращения выброса в атмосферу продуктов горения (технологических газов, черной пыли). Кроме того, их использование удешевляет производство. При использовании СВС процесса не требуется поддерживать высокую (1500 градусов) температуру в реакторах. Для их получения используется дешевое постоянно восполняемое в природе сырье (целлюлоза, крахмал, и т.д.).

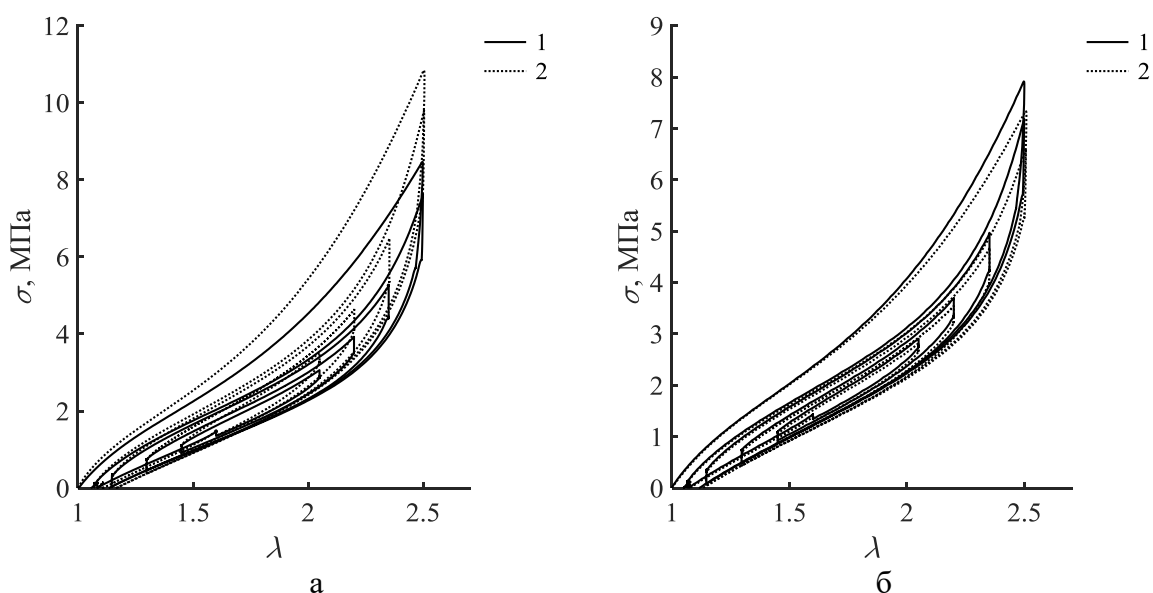


Рисунок 2 — На рисунке показано сравнение свойств материалов в экспериментах со вложенными циклами: а — с техническим углеродом и гибридным наполнителем из нанотрубок и графена (1), с техническим углеродом и многостенными нанотрубками (2); б — с техническим углеродом и гибридным наполнителем из технического углерода и графена (1), материал с техническим углеродом и графеном (2)

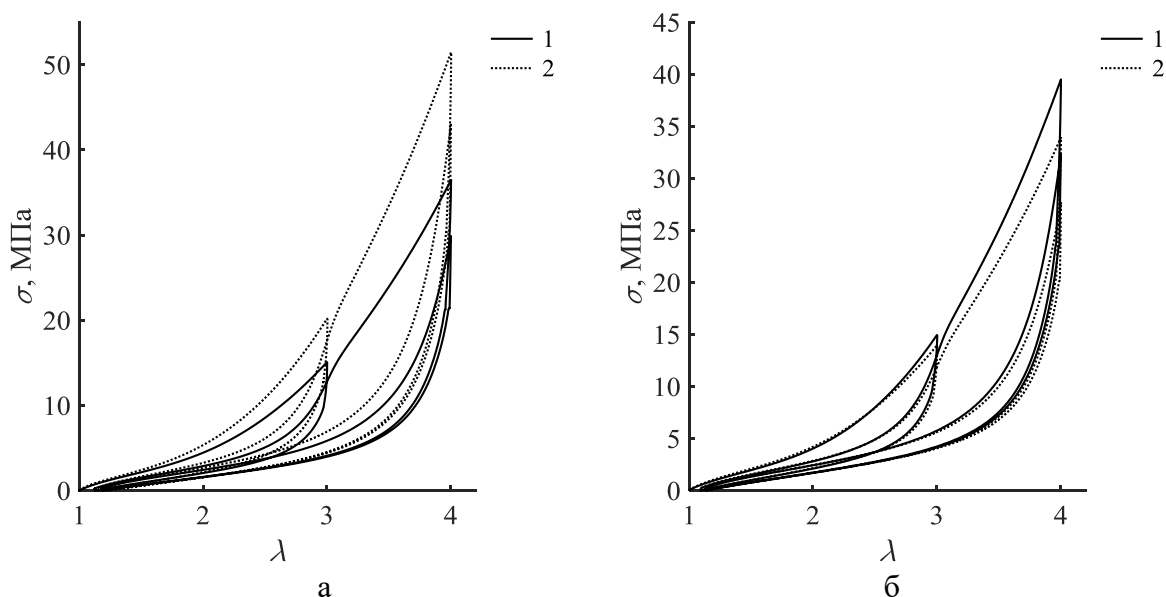


Рисунок 3 — На рисунке показано сравнение свойств материалов в экспериментах с циклами с нарастающей амплитудой при больших деформациях и скорости деформирования 10 % / мин.: а — с техническим углеродом и гибридным наполнителем из нанотрубок и графена (1), с техническим углеродом и многостенными нанотрубками (2); б — с техническим углеродом и гибридным наполнителем из технического углерода и графена (1), материал с техническим углеродом и графеном (2)

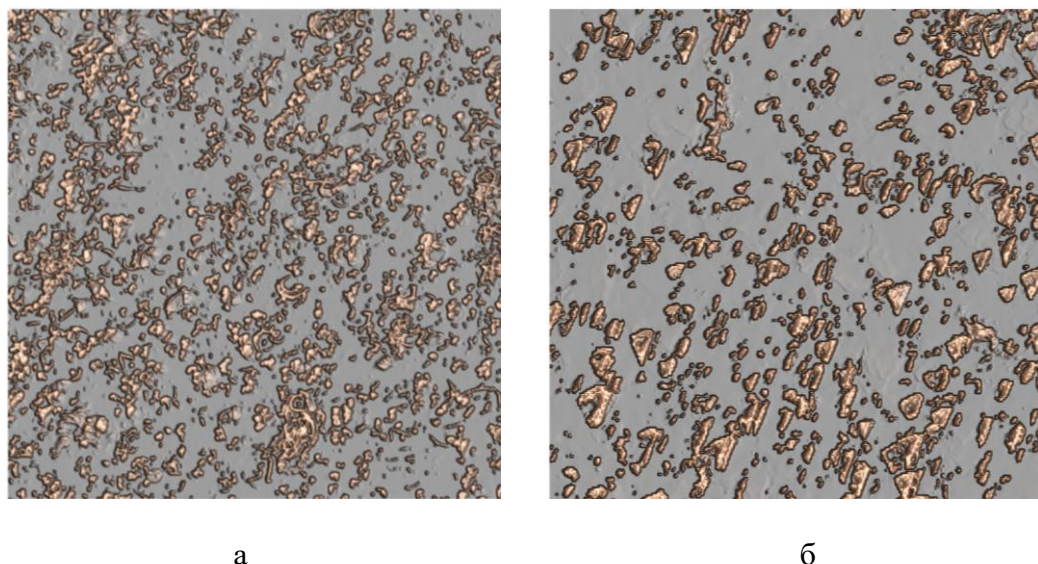


Рисунок 4 — Расположение частиц наполнителя в приповерхностном слое материала у нанокompозита с техническим углеродом и нанотрубками (а), с техническим углеродом и гибридным материалом с нанотрубками (б). Изображения получено с помощью атомно-силовой микроскопии на области 5 мкм на 5 мкм

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.5.1.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ О МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ НАНОКОМПОЗИТОВ С ЦЕЛЬЮ УСТАНОВЛЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ РЕЦЕПТУРОЙ МАТЕРИАЛОВ И ИХ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Мохирева К.А., Свистков А.Л.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

В рамках выполненной работы были исследованы эластомерные наноккомпозиты на основе бутадиен-нитрильного каучука, наполненного а) 40 массовыми частями (м.ч.) технического углерода (ТУ); б) 33 м.ч. ТУ и 7 м.ч. ТУ, модифицированного графеном; в) 33 м.ч. ТУ и 7 м.ч. графена, полученного из крахмала; г) 33 м.ч. ТУ и 7 м.ч. графена, полученного из целлюлозы; д) 33 м.ч. ТУ и 7 м.ч. многостенных углеродных нанотрубок и е) 33 м.ч. ТУ и 7 м.ч. нанотрубок, модифицированных графеном. Модификация наполнителя графеном подразумевает создание гибридного наполнителя. В большинстве исследований под гибридным наполнителем понимают либо последовательное введение в полимерную матрицу двух (или более) различных наполнителей, либо предварительное их смешение вне матрицы с последующим добавлением в матрицу. В рассматриваемых нами материалах реализован иной подход: графен создается непосредственно в среде выбранного для модификации наполнителя с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [1]. Содержание графена в составе гибридного наполнителя составляет 10-15 массовых частей (на 100 массовых частей наполнителя). Далее полученный гибрид вводят в полимерную матрицу в количестве 7 массовых частей на 100 массовых частей каучука.

Рассмотрение особенностей механического поведения материалов и последующий сравнительный анализ проводились на основе результатов экспериментов с вложенными циклами и циклических испытаний с нарастающей амплитудой деформаций. Эксперименты выполнялись таким образом, что на каждом участке смены направления нагружения предусматривались продолжительные выдержки. Такой подход позволяет завершиться основным релаксационным процессам в вязкоупругих системах и вернуть систему к состоянию равновесия. Благодаря предложенной экспериментальной методике напряжения в вязкоупругом материале можно представить в виде суммы равновесной σ_{eq} и диссипативной σ_{dis} составляющих

$$\sigma = \sigma_{eq} + \sigma_{dis}. \quad (1)$$

На рисунке 1 представлены результаты эксперимента с вложенными циклами в виде зависимости истинного напряжения σ (компонента тензора напряжений Коши) от кратности удлинения материала λ вдоль оси растяжения. По «равновесным» точкам можно построить кривую, характеризующую упругое поведение материала. Вертикальная линия обозначает область, где реализуется «установившийся» режим потерь: в этих условиях диссипативная часть тензора напряжений почти не меняет своего значения при деформировании материала с постоянной скоростью. При одновременном добавлении в каучуковую матрицу технического углерода и многостенных нанотрубок, в отличие от материала, наполненного только техническим углеродом в той же массовой пропорции (суммарно 40 м.ч.), увеличивается жесткость материала и ярче проявляются вязкоупругие свойства. Подобный эффект также характерен для композитов на основе другой матрицы (бутадиен-стирольного каучука). Однако, согласно результатам расчётов и сравнения

начального модуля, определённого по «размягчённой» равновесной кривой, материал, наполненный только техническим углеродом, демонстрирует большую жёсткость. Следует отметить, что нанотрубки до введения в матрицу не диспергируются до отдельных частиц, а сохраняются в виде агрегатов («клубков»), внедрённых в эластомерную матрицу. Такая морфология значительно повышает вероятность зарождения и развития микродефектов. Вероятно, технический углерод лучше диспергируется в матрице, а также обеспечивает более эффективное взаимодействие с полярной каучуковой матрицей благодаря своей собственной полярной природе.

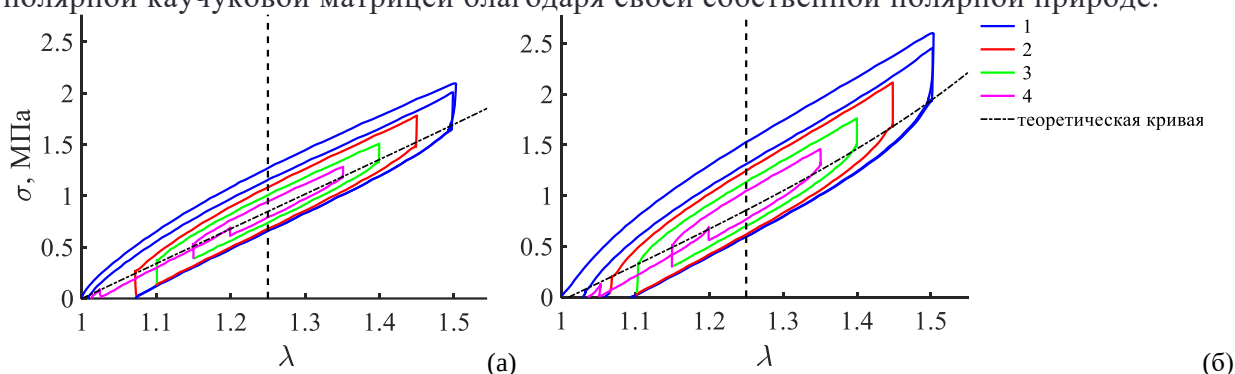


Рис. 1. - Зависимость значений истинного напряжения σ от кратности удлинения λ в эксперименте с вложенными циклами для материала на основе бутадиен-нитрильного каучука, наполненного 40 м.ч. технического углерода (а); 33 м.ч. ТУ и 7 м.ч. многослойных нанотрубок (б). Абсолютная величина скорости изменения кратности удлинения образца $|d\lambda/dt|$ соответственно равна: 4 мин⁻¹ (1); 4 мин⁻¹ (2); 1 мин⁻¹ (3); 0.25 мин⁻¹ (4). Штрих-пунктирная линия (σ_{eq}) — «равновесная» кривая. Вертикальная пунктирная линия обозначает середину области с «установившимся» режимом потерь

Модификация многостенных нанотрубок графеном приводит к интересному эффекту: жесткость материала снижается и одновременно возрастает его деформативность. Также отмечается прирост диссипативных свойств — повышение релаксации напряжений. Такое поведение характерно для систем, в которых графен способствует перераспределению внутренних напряжений, активизации механизмов внутреннего трения и, возможно, образованию более гибких межфазных границ между матрицей и наполнителем

В работе получены количественные значения параметров, определяющих вязкоупругое поведение высоконаполненных эластомерных материалов (разные виды наполнителей). Дано сравнение с результатами экспериментов прошлого года для материалов на основе бутадиен-стирольного каучука. Планируется продолжить исследование с неполярной матрицей и гибридными наполнителями при больших концентрациях.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.5.2.

Литература

1. Vozniakovskii A., Kidalov S., Voznyakovskii A., Podlozhnyuk N. Hardness and thermal conductivity of a composite based on aluminum modified with a hybrid material detonation nanodiamond/few-layer graphene // Fuller. Nanotub. Carbon Nanostruct. 2021. Vol. 30(1). P. 205–210. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2021.2014455>

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМЫ ВКЛЮЧЕНИЙ ПОД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЭЛАСТОМЕРНОГО НАНОКОМПОЗИТА

Изюмов Р.И., Свистков А.Л.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Разработана методика расшифровки результатов атомно-силовой микроскопии с целью восстановления по полученным экспериментальным данным подповерхностной структуры жёсткого наполнителя в мягком эластомерном связующем.

Предложен относительно простой приближенный алгоритм вычислительного моделирования кривых индентирования материала с учетом изменения поверхностной энергии системы зонд-материал-воздух в процессе увеличения области контакта с материалом. При вычислительном моделировании учитываются конечные деформации мягкого связующего в эластомерном нанокompозите. Важную роль играют расчеты скачков зонда как при внедрении в материал, так и при его извлечении. Сформулирован критерий, позволяющий определить момент отрыва зонда от налипшего на него эластомера на обратном ходе зонда.

Алгоритм позволяет провести анализ доступной в экспериментах информации, связанной с особенностями геометрии жестких включений под поверхностью материала, расположенных на небольшой глубине. Показано, что получаемые при классическом индентировании материала образы могут отличаться от реальной геометрии. Границы включений перестают быть четкими при увеличении глубины расположения твердых объектов. При еще большей глубине расположения включений, их невозможно обнаружить при индентировании. Это граница видимости объектов.

Установлено, что диссипативные потери, получаемые при сравнении прямого и обратного хода зонда, дают много полезной информации о глубине расположения участков частиц наполнителя. Величина диссипативных потерь связана с количеством налипшего на зонд эластомера, которое существенно зависит от возможности внедрения зонда в образец.

На основе результатов вычислительного моделирования предложен метод обработки данных, полученных в полуконтактном режиме работы АСМ. Он обладает высокой чувствительностью к расположению жестких объектов при получении карты нахождения включений в приповерхностном слое материала. При этом, для обработки экспериментальных данных не требуется осуществлять искусственное выравнивание поверхности материала.

Результаты моделирования показали, что глубина залегания включений существенно влияет на характер кривых прямого и обратного хода зонда при индентировании и определяет величину диссипации энергии. Это позволяет использовать диссипацию как индикатор наличия подповерхностных структур. Предложенный метод анализа фазового сдвига в полуконтактном режиме АСМ продемонстрировал возможность выявления скрытых объектов без необходимости проведения глубокого индентирования. В сравнении с традиционными методами обработки данных АСМ, основанными на критерии достижения при внедрении зонда в материал фиксированной силы, новый метод, использующий данные о диссипации, обеспечивает более точное определение геометрии и расположения подповерхностных структур. Примеры использования разработанного метода показаны на рис. 1, рис. 2. Предложенный подход

может быть рекомендован для использования при анализе данных, полученных в полуконтактном режиме работы АСМ.

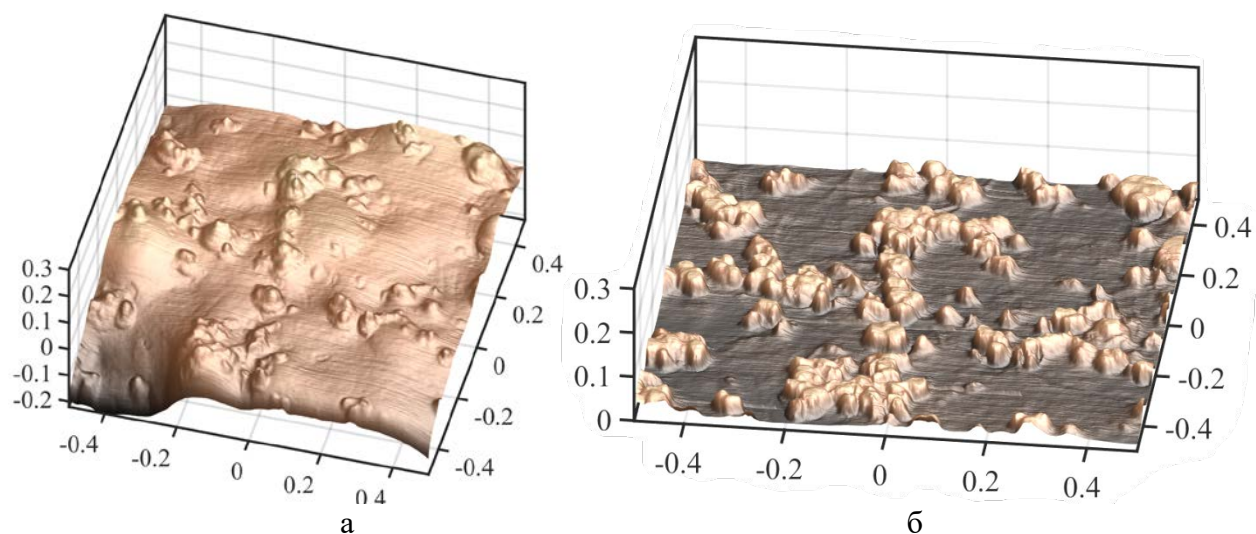


Рис. 1. Иллюстрация, полученная при обработке данных с помощью полуконтактного режима сканирования поверхности, размером 1 мкм на 1 мкм: а — геометрия поверхности; б — восстановленная по фазовому портрету подповерхностная структура материала. Наполнителем является технический углерод с детонационными наноалмазами

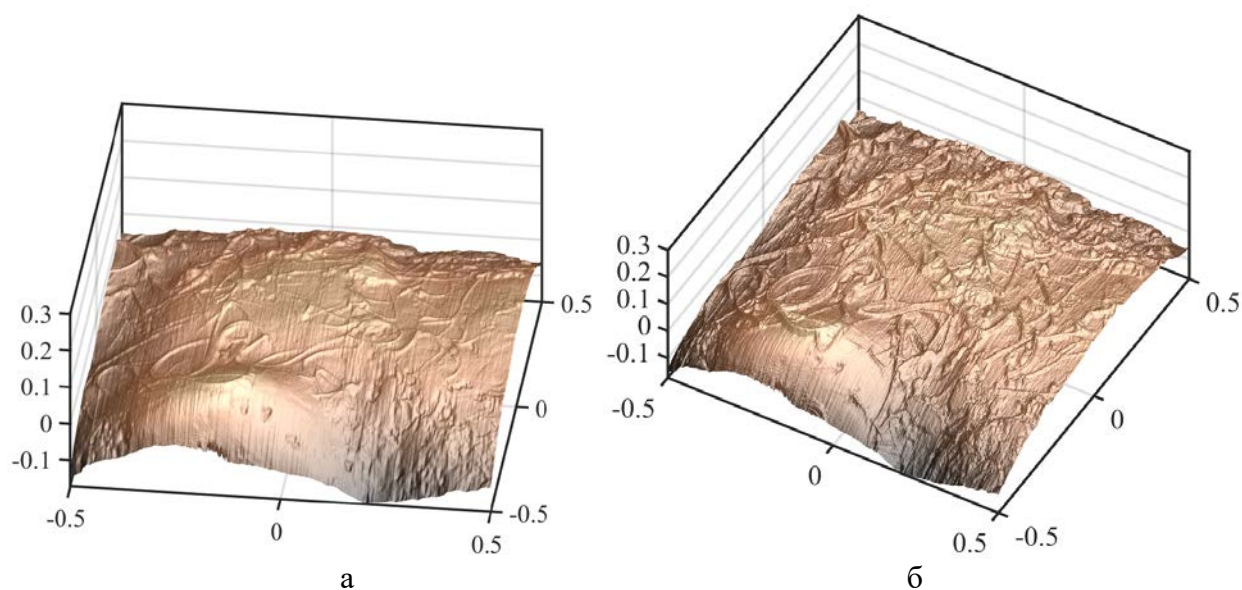


Рис. 2. Иллюстрация метода. На рисунке (а) показана геометрия поверхности образца. На рисунке (б) приведено изображение поверхности образца, у которого снят слой связующего на следующую величину: 1) до включения, если включение расположено в приповерхностном слое; 2) до глубины потери видимости объектов в эластомере, если не обнаружены включения в приповерхностном слое. Наполнителем является технический углерод с многостенными нанотрубками

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.5.3.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ В НАПОЛНЕННОЙ РЕЗИНЕ МЕТОДАМИ ИНДЕНТИРОВАНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Морозов И.А., Изюмов Р.И., Беляев А.Ю.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Физико-механические свойства композиционных материалов напрямую зависят от распределения наполнителя в матрице. Для прямого изучения структуры наполнителя используют различные виды микроскопии в связке с методами обработки изображений. В частности, оценка качества диспергирования наполнителя в матрице каучука и его влияние на механические характеристики материала широко описано в литературе [1].

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) активно используется для изучения наполненных эластомеров [2, 3]. По сравнению с другими методами она обладает рядом преимуществ: высокое пространственное разрешение, относительная простота подготовки образцов и проведения эксперимента; возможность получения трехмерного рельефа и физико-механических свойств поверхности.

Методы машинного обучения всё чаще применяются в обработке [4] и анализе изображений [5]. Известны работы в области машинного обучения и обработки силовых кривых индентирования [6].

В настоящей работе представлен разработанный нами способ определения глубины расположения жестких включений в приповерхностном слое полимерной матрицы. Образцы наполненной резины исследовали с помощью быстрого индентирования методами атомно-силовой микроскопии. Режим быстрого индентирования позволяет получать массивы силовых кривых с высоким разрешением в плоскости xu , т.е. каждой точке поверхности соответствует своя силовая кривая – зависимость усилия от глубины вдавливания.

Для обработки экспериментальных данных использовали метод конечных элементов (МКЭ) и две модели машинного обучения (МО). Методом конечных элементов проводили моделирование вдавливания параболического индентора в мягкий гиперупругий слой на жесткой подложке. В задаче варьировали радиус острия индентора и толщину мягкого слоя. В результате, получен набор модельных силовых кривых, каждой из которых соответствуют свои толщине слоя и радиус индентора (всего более двух тысяч вариантов).

Экспериментальные силовые кривые обрабатывали методами машинного обучения. Все силовые кривые разделили на две группы: к первой отнесли те, которые достаточно хорошо аппроксимируются полученной из МКЭ модельной зависимостью. Во вторую группу отнесли искаженные силовые кривые. Наличие искаженных силовых кривых (например, перегибы) обусловлено динамическими взаимодействиями индентора со структурно-механическими неоднородностями материала.

Первую часть экспериментальных данных обрабатывали МО-моделью, натренированной на результатах МКЭ. В результате была получена толщина слоя полимера, скрывающего жесткие включения. Вторую группу данных обрабатывали МО-моделью, натренированной на результатах работы первой модели; в качестве входных данных второй модели использовали два параметра силовых кривых (глубина вдавливания и работа адгезии).

МО-задачи решали при помощи языка Python. Данные предварительно нормализовали. Для верификации модели всю выборку разделяли на обучающую и тестовую в соотношении 0.8 к 0.2. Поиск модели, дающей наименьшую погрешность, производили автоматическим перебором; наилучшей первой моделью оказался метод градиентного бустинга, для которого коэффициент детерминации на тестовой выборке оказался > 0.999 . Наилучшая вторая модель также основана на градиентном бустинге, для нее > 0.92 .

В итоге, была получена карта глубины включений для всего изображения. Разность исходного рельефа (рис. 1а) и глубины включений дает трехмерную поверхность, отражающую расположение включений наполнителя в поверхностном слое материала (рис. 1б). На рисунке 1б хорошо видно, что на поверхности появилось большое количество включений ранее скрытых слоем полимера, т.е. получена псевдотрехмерная структура наполнителя в матрице.

В целом, рассмотренная методика полезна для оценки качества диспергирования наполнителя в матрице, а также для получения других количественных параметров микроструктуры (например, фрактальная размерность, размеры включений, расстояние между соседними частицами и т.д.).

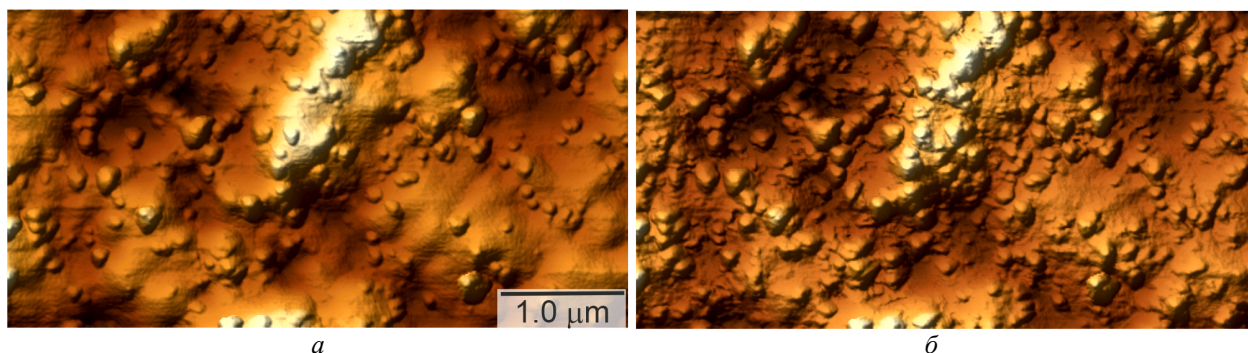


Рис. 1. – Исходный рельеф поверхности наполненной техническим углеродом резины, полученный методом индентирования (а) и результат обработки – псевдотрехмерная структура наполнителя в полимере (б)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.5.3.

Литература

1. Hess W.M. Characterization of dispersions // Rubber chemistry and technology. 1991. Vol. 64. P. 386-449.
2. Johnson L.L. Atomic force microscopy (AFM) for rubber // Rubber chemistry and technology. 2008. Vol. 81. P. 359-383.
3. Morozov I.A., Solodko V.N., Kurakin A.Yu. Quantitative study of filled rubber microstructure by optical and atomic force microscopy // Polymer testing. 2015. Vol. 44. P. 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.04.007>
4. Huang B., Li Z., Li J. An artificial intelligence atomic force microscope enabled by machine learning // Nanoscale. 2018. Vol. 10. P. 21320-21326. <https://doi.org/10.1039/C8NR06734A>
5. Ismail B., Maher M., Sarah A. X-Ray Image based Pneumonia Classification using Convolutional Neural Networks // ACCENTS Transactions on Image Processing and Computer Vision. 2020. Vol. 6. P. 54-67. <https://doi.org/10.19101/TIPCV.2020.618050>
6. Nguyen L.T.P., Liu B.H. Machine learning framework for determination of elastic modulus without contact model fitting // International Journal of Solids and Structures. 2022. Vol. 256. P. 111976. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111976>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕСОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКТИВНО-СИЛОВЫХ СХЕМ ЛОПАСТИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Ведерников Д.В., Левченков М. Д., Фомин Д. Ю.

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского

Работа посвящена оценке эффективности применения сетчатых конструктивно-силовых схем (КСС) для композитной конструкции лопасти ветрогенератора.

Сетчатые КСС имеют потенциал в снижении веса применительно к авиационным конструкциям фюзеляжа и панелям крыла. В ряде отечественных и международных проектов было показано, что в результате применения таких КСС может быть обеспечено снижение веса более 10% [1],[2],[3],[4].

Основной целью настоящей работы была оценка потенциала сетчатых композитных структур в снижении веса конструкции типовой лопасти ветрогенератора.

В качестве объекта исследования была взята типовая лопасть ветрогенератора (рис 1) с двумя альтернативными вариантами КСС:

- Традиционной обшивочной (кессонная с двумя лонжеронами)
- Сетчатой с несилевыми обшивками

а) обшивочная КСС

Лонжероны

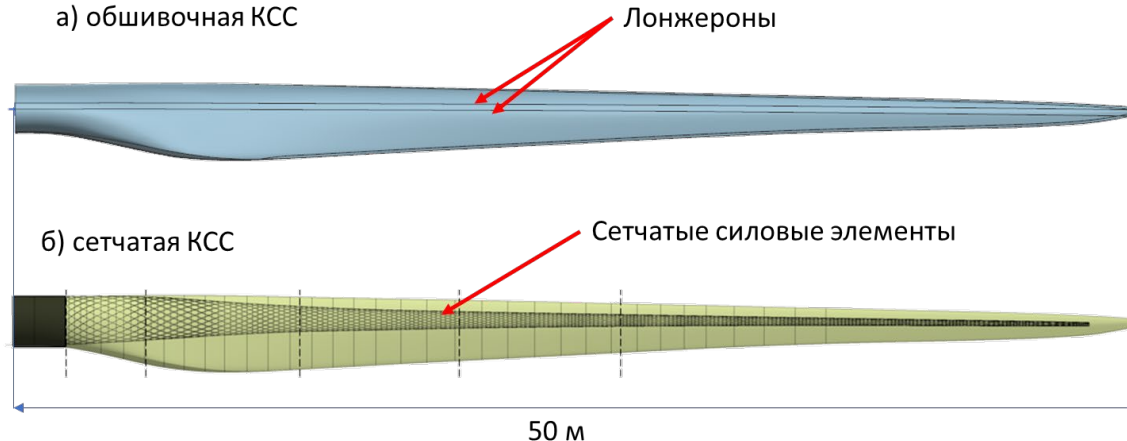


Рис. 1. – Альтернативные варианты КСС лопасти ветрогенератора

Для решения поставленной задачи были построены параметрические прочностные модели на основе метода конечного элемента (МКЭ) для каждого из вариантов КСС лопасти ветрогенератора. Были проведены параметрические расчетные исследования прочности и веса сетчатых композитных лопастей с несколькими альтернативными вариантами сетчатой структуры.

Предварительный анализ КСС лопасти показал, что с точки зрения весовой эффективности изготовление цельной лопасти является нецелесообразным. Это связано, прежде всего, с намоточной технологией изготовления – единственной доступной на данный момент технологией изготовления подобных конструкций. Намоточная технология предполагает, что ширина и высота ребер будут одинаковы по всей длине лопасти, что делает слабонагруженную концевую часть лопасти крайне неэффективной по весу. Кроме того, сложная форма внешних обводов лопасти делает целесообразным разделение сетчатой конструкции силовой части лопасти на несколько сегментов,

имеющих цилиндрическую или коническую форму – то есть форму тел вращения, которые могут быть изготовлены по намоточной технологии.

Для создания лопасти с высокой весовой эффективностью в реберном каркасе лопасти предлагается использовать нерегулярную структуру реберной сетки с изменяющимися по окружности углом спиральных ребер (рис 2.). Такой тип структуры позволяет более эффективно воспринимать действующие нагрузки при сохранении массы лопасти. Помимо этого, конструкции отсека такой структуры может быть изготовлен посредством намотки, как и в случае с регулярной структурой из-за отсутствия топологических различий.



Рис. 2. – Сетчатая структура отсека фюзеляжа, нерегулярного по окружности

В работе были проведены оптимизационные расчеты по оценке веса нескольких вариантов конструкции лопасти ветрогенератора с сетчатой КСС. В рассмотренных вариантах сетчатых конструкций лопасти основными элементами конструкции были сетчатые осесимметричные конические силовые оболочки и трехслойные панели, формирующие омываемую поверхность.

В результате проведенных оптимизационных расчетов показано, что использование сетчатой КСС дает существенный весовой эффект в корневой зоне лопасти (около 50% длины лопасти). Обоснован потенциал в снижении веса конструкции лопасти на 12,7%, относительно варианта лопасти с обшивочными силовыми элементами. При этом жесткостные характеристики сетчатого варианта соответствует жесткости исходного (обшивочного) варианта конструкции.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.2.1.

Литература

1. Шаныгин А.Н. Особенности проектирования про-композитных конструкций ЛА // Труды ЦАГИ. — 2011. — Выпуск 2698. — С. 63–69.
2. L. Zudova, K. Zudov, V. Fomin “Hybrid structural layout of the wing box for small aeroplane”, 9th EASN International Conference, Greece, 2019
3. Shanygin A, Dubovikov E, Fomin V, Mareskin I, Zichenkov M. Designing pro-composite truss layout for load-bearing aircraft structures. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2017;1-12.
4. Mareskin I. “Multidisciplinary optimization of pro-composite structural layouts of high loaded aircraft constructions”, In Proceedings of the 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Daejeon, Korea; 2016.

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ РЕБЕРНОЙ СЕТКИ ОТСЕКА ФЮЗЕЛЯЖА, СОДЕРЖАЩЕЙ НЕРЕГУЛЯРНОСТИ УГЛОВ НАКЛОНА РЕБЕР

Левченков М.Д.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

В данной работе проведены оптимизационные исследования с целью улучшения жесткостных и массовых характеристик композитных отсеков за счет создания положительной структурной нерегулярности ребер силового каркаса. Для решения этой задачи разработана методика формирования и оптимизации нерегулярных композитных сетчатых отсеков, содержащего силовой каркас и систему гибких обшивок, применительно к конструкциям транспортной и строительной отраслей. Следует отметить, что большинство сетчатых конструкций, существующих в настоящее время, имеют регулярную структуру ребер по длине и поперечному направлению отсеков [1]. По этой причине, такие конструкции, работающие в качестве балок, имеют избыточные запасы прочности, поскольку внешние факторы нагружения изменяются по длине балки, а сетчатая структура постоянна (рис. 1).

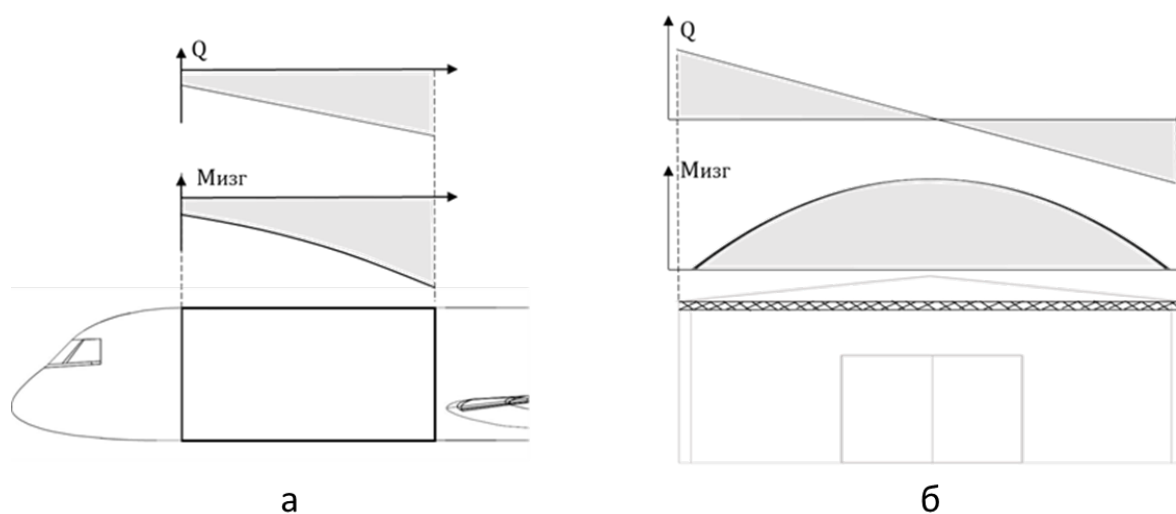


Рис. 1. – Распределение компонентов внешнего нагружения по длине отсеков: носовой части (а) и несущей балки большепролетного строения (б).

К сожалению, ликвидировать избыточные запасы прочности для существующих способов производства с учетом низких свойств современных связующих, невозможно за счет изменения сечений ребер. По этой причине разработанный метод улучшения жесткостных и массовых характеристик позволяет улучшить весовое совершенство сетчатых конструкций (обеспечить снижение веса до 4-7 % по отношению к весу аналогичных регулярных структур) и в большей степени использовать потенциал сетчатых конструкций.

В рамках настоящей работы исследованы два типа структурной нерегулярности (рис. 2), позволяющие улучшить массовые и жесткостные характеристики реберной сетки для рассматриваемых конструкций. Структурная нерегулярность реберного каркаса

создавалась за счет изменения углов спиральных ребер по длине и окружности цилиндрических отсеков.

Оценка зависимости прочностных, жесткостных и массовых характеристик рассматриваемых отсеков от углов спиральных ребер проводилась с использованием разработанной трехуровневой автоматизированной параметрической МКЭ модели. В число параметров, по которым производилась оптимизация, входили как новые параметры нерегулярности, заключающиеся в изменении структуры реберной сетки по длине и поперечному сечению отсека [2], так и параметры сечений ребер и «традиционные» для регулярных сетчатых структур параметры, определяющих форму ячеек сетки [3].

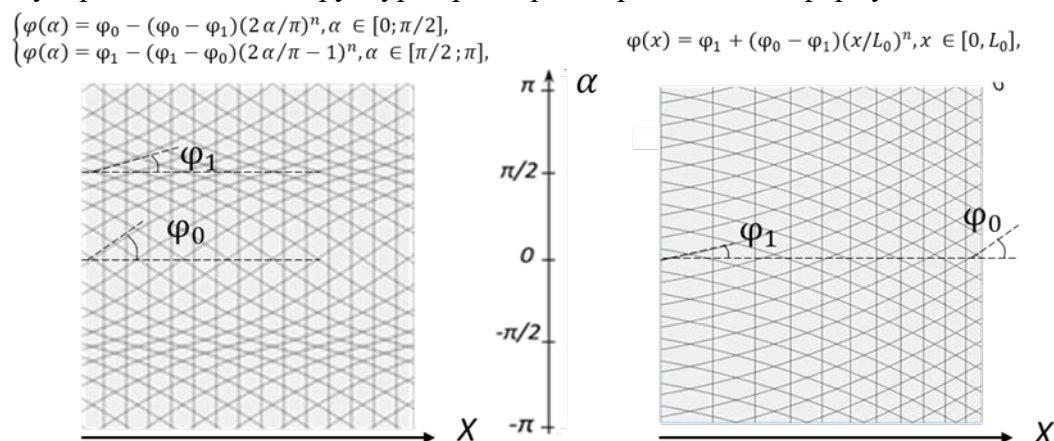


Рис. 2. – Изменение формы реберной сетки по сечению и по длине (на развертке).

В результате проведенных исследований было показано, что подбор формы нерегулярности при учете распределения силовых факторов по длине и сечению отсека позволяет снизить массу до 6-8 % по сравнению с регулярными сетчатыми отсеками или до 17-19 % по отношению к металлическим отсекам.

Результаты проведенных оптимизационных исследований могут быть полезны при проектировании интегральных сетчатых композитных конструкций, подверженных неравномерному нагружению в авиации и различных отраслях машиностроения и строительства.

Работа подготовлена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.2.1.

Литература

1. Кондаков И.О. Исследование статической и ударной прочности сетчатых композитных конструкций фюзеляжа: Дисс. канд. техн. наук. – Жуковский: ФГУП «ЦАГИ». – 2020. – 138 с.
2. «Исследование прочности реберного отсека фюзеляжа с нерегулярной структурой сетки» Левченков М.Д., Дубовиков Е.А., Кондаков И.О., Фомин Д.Ю., Шаныгин А.Н. Ученые записки ЦАГИ. 2022. Т. 53. № 6. С. 131-141.
3. Васильев В. В., Разин А. Ф., Азаров А. В. Композитные сетчатые конструкции – проектирование, расчёт и изготовление // М.: Инновационное машиностроение. 2023. 488 с.

ОБЩАЯ СХЕМА ДЕМОНСТРАТОРА КОМПЛЕКСНОЙ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И СОЗДАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЕГО ЧАСТЕЙ ДЛЯ АГРЕГАТОВ/ОТСЕКОВ/ФРАГМЕНТОВ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРО-БИОНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Шаныгин А.Н., Фомин Д.Ю.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Для проверки эффективности новых принципов создания легких и надежных композитных конструкций с встроенной системой контроля технического состояния для перспективных пассажирских самолетов и демонстрации новых качеств конструкции в способности регистрации уровня и локализации ударных воздействий, приходящих на нее, был разработан отсек-демонстратор (далее – демонстратор) с встроенной системой волоконно-оптических датчиков деформаций (далее - ВОДД). На рисунке 1 показана его модель и приведены некоторые геометрические характеристики. Демонстратор имеет цилиндрическое сечение. Предварительное значение диаметра демонстратора указано на рисунке 1, окончательное будет определено в процессе выбора подходящей оснастки для его изготовления. Демонстратор предназначен для проведения экспериментальных исследований, направленных на апробацию принципов бионического построения силовой схемы демонстратора и проверки работоспособности систем, встроенного мониторинга технического состояния демонстратора при различных видах воздействия.

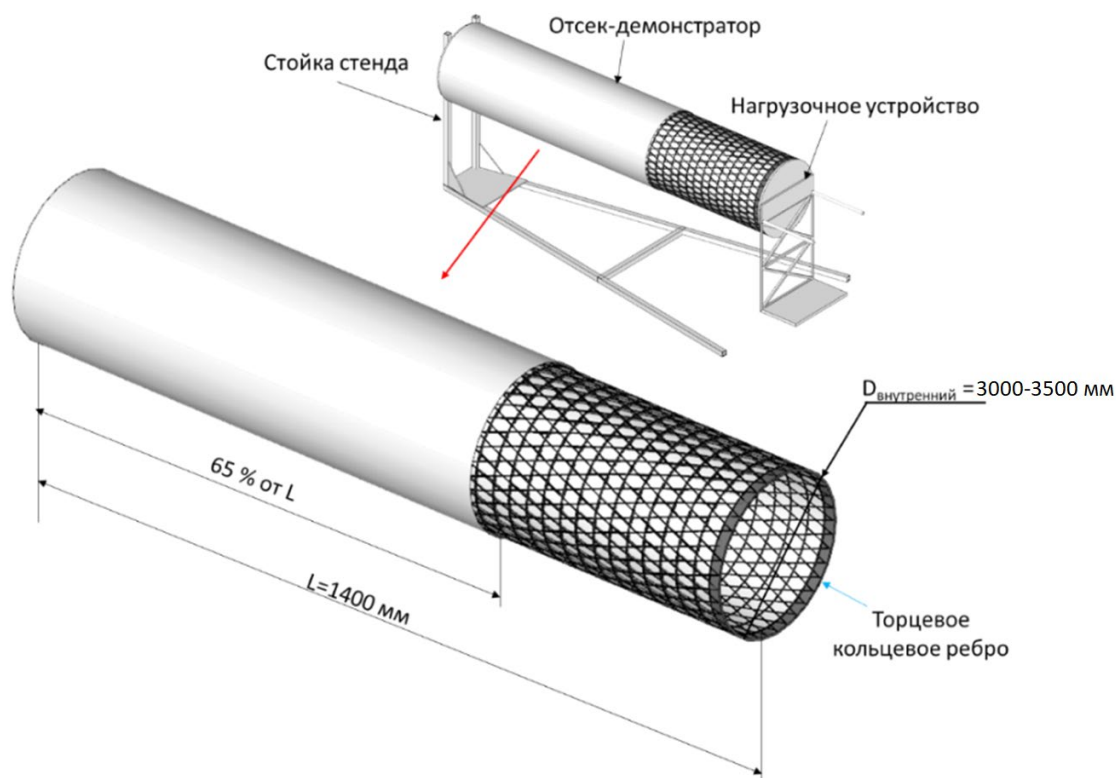


Рисунок 1 – Геометрическая модель и габаритные размеры Отсека-демонстратора

Конструкция демонстратора, кроме сетчатого каркаса, также включает внутреннюю и внешнюю обшивки, ВОДД, расположенных вдоль отдельных ребер, и легкий заполнитель пространства между ребрами. Демонстратор с торцов имеет специальные шпангоуты для крепления к стойке демонстрационного стенда и к нагрузочному устройству стенда. Крепление демонстратора к стойке демонстрационного стенда и нагрузочному устройству стенда осуществляется с использованием переходной плиты круглой формы диаметром до 4000 мм. В защитных накладках вдоль двух пар попарно симметричных спиральных ребер размещаются ВОДД на основе брегговских решеток и пьезодатчики. Выводы ВОДД выполнены с торцевых сторон демонстратора до интеррогатора. Выводы пьезодатчиков выполнены с внешней поверхности демонстратора до коммутатора (См. рис. 2).

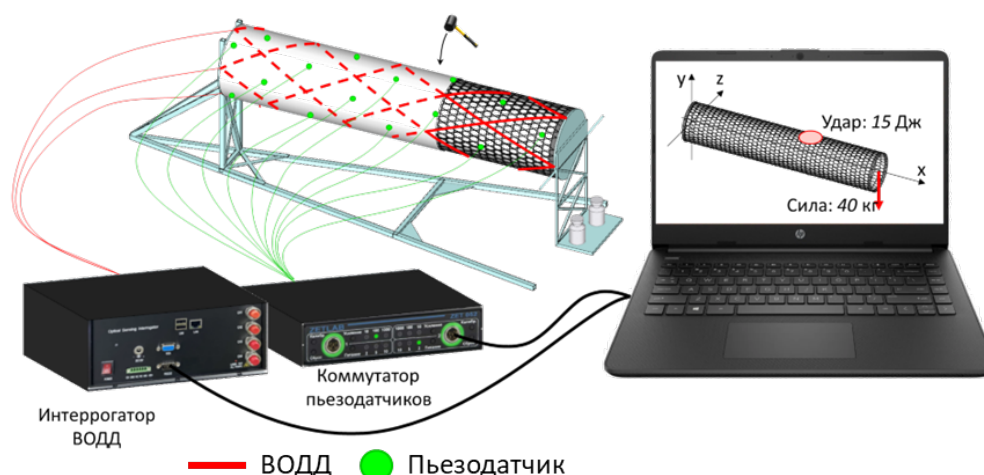


Рисунок 2 – Общая схема Отсека-демонстратора

Условиями прочности для демонстратора будут следующие:

- нагружение вертикальной перерезывающей силой (расчетное значение 500 кг);
- нагружение крутящим моментом относительно продольной оси демонстратора (расчетное значение 70 кг·м);
- ударные нагрузки (расчетное значение 15 Дж).

Ударные нагрузки могут наноситься в различные зоны отсека в соответствии с техническим заданием на его эксплуатацию.

Результаты экспериментальных исследований, полученные в настоящей работе, могут быть полезны также для анализа и разработки алгоритмов по поиску оптимальных сетчатых конструктивно-силовых схем, применяемых в аэрокосмической отрасли.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.2.2.

Литература

1. Ведерников Д.В., Левченков М.Д., Марескин И.В., Миргородский Ю.С., Чернов А.В., Шаныгин А.Н., "Сетчатая оболочка из композиционных материалов", Патент РФ на изобретение №2834901, 2025

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СИНЕРГЕТИКИ ОТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА С ЭЛЕМЕНТАМИ СИЛОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Шаныгин А.Н.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Недостаточно высокие физические характеристики современных связующих, склонных к растрескиванию и хрупкому разрушению, нивелируют преимущества композиционных материалов как в плане весовой эффективности, так и в вопросах снижения стоимости эксплуатации, учитывая, что основные повреждения композитной конструкции (даже при ударных воздействиях) зарождаются и развиваются внутри композитной структуры, а не на ее поверхности как характерно для металлической конструкции. Для современных композитных конструкций чтобы обеспечить требуемую надежность эксплуатации, приходится увеличивать запас прочности и снижать интервал времени между регламентными работами.

Для решения задач по повышению надежности эксплуатации композитных конструкций в работе выполнен поиск публикаций по обеспечению прочности и снижению веса композитных каркасных конструкций, полученных в рамках открытых отечественных и международных проектов [1, 2] за последние 15 лет, включая НИЦМУ «Сверхзвук» [3], в результате которых предложена рациональная концепция конструкции панели, на примере которой показано преимущество каркасных про-бионических конструкций для объектов транспортной категории в обеспечении прочности, надежности, весовой эффективности за счет создания положительной синергии взаимодействия композитной конструкции с сетчатой конструктивно-силовой схемой и встроенной системой мониторинга технического состояния (рис.1).

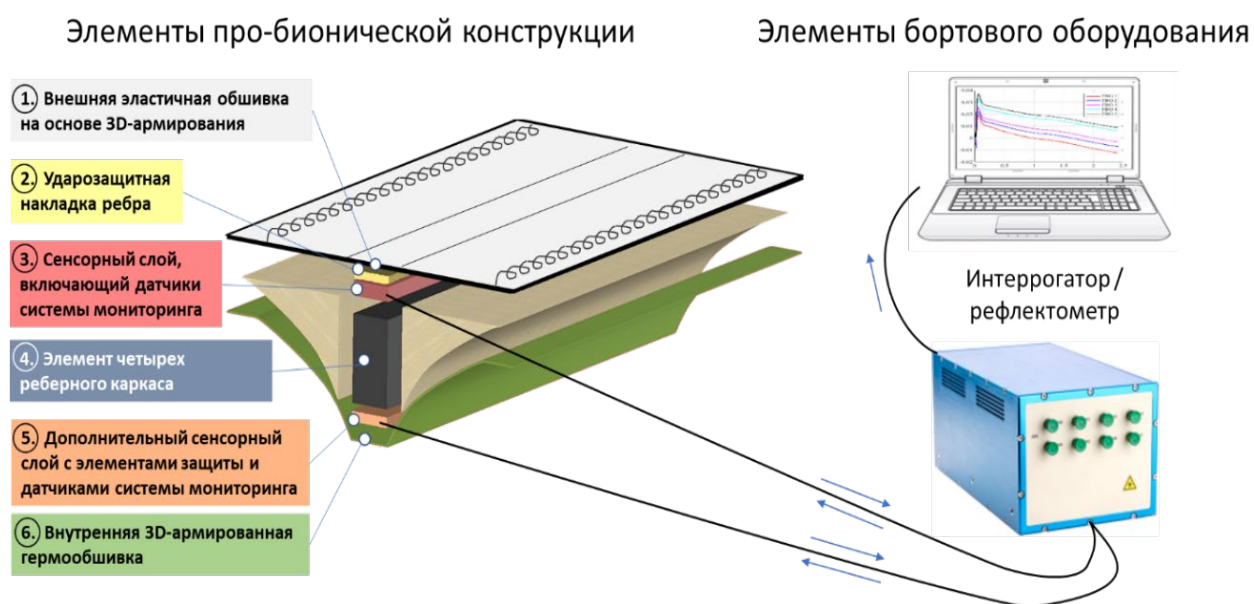


Рис. 1. Концепция легкой, прочной и надежной в эксплуатации панели про-бионической конструкции с многоуровневой системой защиты и встроенной системой мониторинга технического состояния

Показано, что такая синергия позволяет не только обеспечить мониторинг появления ударных повреждений с регистрацией уровня энергии и локализацией, но и решить тем самым проблему постоянной диагностики ответственных силовых элементов с целью учета деградации от воздействия факторов среды.

На примере типового композитного сетчатого отсека, изготовленного на основе принципов бионической конструкции приведены оценки возможного снижения веса сетчатой конструкции для объектов транспортной категории и повышения их надежности в эксплуатации, а также оценки по снижению стоимости за счет полученного снижения веса.

Результаты данной работы могут быть использованы также для разработки рациональных конструкций не только объектов транспортной категории, но и ответственных объектов строительных сооружений, таких как балки перекрытия, фермы, опоры, которые подвержены ударным и климатическим воздействиям. Создание для данных конструкций простой, надежной и достаточно дешевой системы мониторинга технического состояния, применительно к данным сооружениям, на основе волоконно-оптических датчиков деформации (ВОДД) может позволить значительно сократить время регламентных работ, а также увеличить интервалы между ними. При этом контроль технического состояния может осуществляться удаленно и одновременно для многих объектов. Данные системы могут иметь большую точность в определении степени деградации конструкции, которая определяется за счет изменения деформаций в конструкциях в течении различных отрезков времени и сравнения этих величин.

На следующем этапе данной работы будут проведены тестовые испытания образцов с встроенными датчиками ВОДД, в результате которых будет осуществлена оценка не только работоспособности данной системы, но и стоимость создания данной системы, а также вес ее компонентов. Следует отметить, что стоимость и вес компонентов систем мониторинга на основе ВОДД снизилась за последние несколько лет, при этом вес интеррогаторов (основного элемента данной системы) снизился значительно.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.2.3

Литература

1. FP7 ALaSCA project // URL: http://cordis.europa.eu/result/rcn/149775_en.html.
2. FP7 PoLaRBear project // URL: <https://cordis.europa.eu/result/rcn/197045/en>.
3. S.L. Chernyshev, E.A. Dubovikov, A.A. Ionov, I.O. Kondakov, A.N. Shanygin, M.Ch. Zichenkov Basic principles for creating light, efficient and safe structures for the next generation supersonic transport. Acta Astronautica 2023; 204:728–737. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.10.035>.

РАЗРАБОТКА ОБРАЗЦОВ ФРАГМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ, КОНСТРУКТИВНО-ПОДОБНЫХ ОБРАЗЦОВ, ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ АГРЕГАТОВ/ОТСЕКОВ ПЛАНЕРА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА, СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ, КОРПУСОВ МАШИН

Фомин Д. Ю., Шаныгин А.Н., Марескин И.В.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского

В настоящей работе представлены результаты разработки экспериментальных образцов нового поколения композитных конструкций, построенных на основе про-бионических принципов, опубликованных в работах [1][2], для валидации встроенной системы мониторинга технического состояния. Такие системы мониторинга критически необходимы для надежной и безопасной эксплуатации высоконагруженных ответственных композитных конструкций объектов транспортного назначения, строительных сооружений, энергетических установок, при современных уровнях свойств связующих в композиционных материалах. Это связано с тем, что современные композитные конструкции крайне чувствительны к ударным воздействиям, после которых к тому же начинаются деградации их композитной структуры. Дополнительным неприятным фактором при этом является то обстоятельство, что последствия ударных воздействий приводят к серьёзным нарушениям прочности и процесс деградации свойств конструкции как правило происходит незаметно, так как критический очаг деградации находится внутри композитной структуры.

Экспериментальные объекты, разработанные в рамках данной работы с целью определения работоспособности систем мониторинга, представляют собой:

- фрагменты конструкций,
- конструктивно-подобные образцы,
- элементарные образцы.

Для этого планируется проведение испытаний экспериментальных объектов как на статическую прочность, так и на ударные и климатические воздействия. В качестве объектов исследований будут использованы два типа конструктивно-подобных образцов (КПО), а именно:

- КПО с каркасной конструктивно-силовой схемой (КСС), построенной на основе про-бионических принципов для сетчатой панели из однонаправленных ребер, имеющий внешнюю обшивку, элементы системы защиты и датчики системы мониторинга технического состояния (рис.1)
- КПО с каркасной КСС на основе про-бионических принципов для цилиндрической композитной оболочки, имеющей симметричную перекрестную схему армирования (рис.2)

Данные КПО необходимы для экспериментального изучения напряженно-деформированного состояния про-бионической конструкции при различных типах внешних нагрузок (статические, ударные и т.д.) с целью валидации принципов формирования про-бионической конструкции, а также для изучения возможностей различных типов датчиков системы мониторинга технического состояния для определения параметров НДС конструкции в ходе нагружения и для регистрации ударного воздействия.

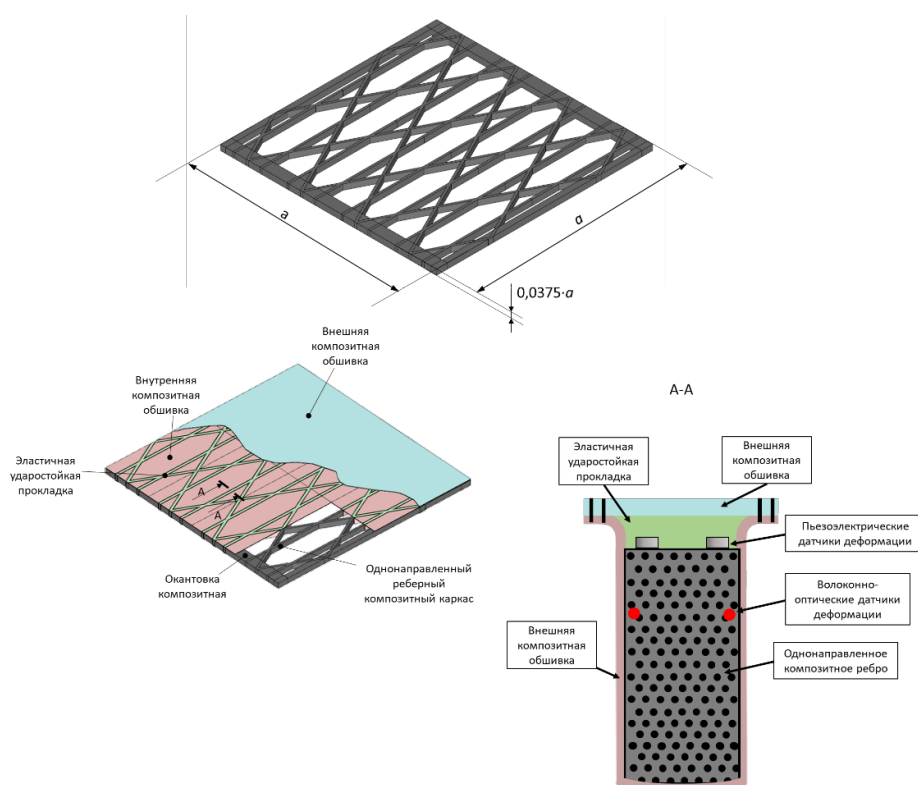


Рис. 1. – КПО с каркасной КСС, построенной на основе про-бионических принципов для сетчатой панели. Структура и геометрические параметры

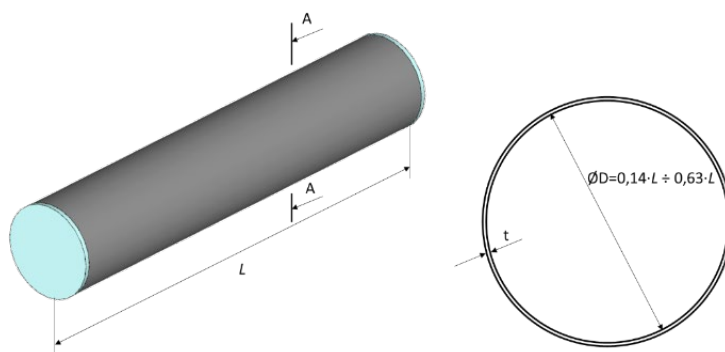


Рис. 2. – Геометрические параметры и внешний вид КПО с каркасной КСС на основе про-бионических принципов для цилиндрической композитной оболочки

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.2.4.

Литература

1. S.L. Chernyshev, E.A. Dubovikov, A.A. Ionov, I.O. Kondakov, A.N. Shanygin, M.Ch. Zichenkov Basic principles for creating light, efficient and safe structures for the next generation supersonic transport. Acta Astronautica, 2022.
2. Кондаков И.О., Чернов А.В., Шаныгин А.Н., Сапожников С.Б. Защита силовых элементов композитной сетчатой оболочки летательного аппарата от низкоскоростных локальных ударных воздействий, Mehanika kompozitnyh materialov. 2021. Т. 57. № 6. С. 1025-1036

ОЦЕНКА ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СИНЕРГЕТИКИ ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИХ (ЭКО) СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Марескин И.В., Фомин Д.Ю.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

В работе предложен один из вариантов ресурсосберегающих способов изготовления композитных сетчатых отсеков, при котором часть технологической оснастки становится частью изготавливаемой конструкции. При этом предложенный способ изготовления позволяет не только успешно реализовать все элементы пробионической конструкции в соответствии с разработанной конструктивно-силовой схемой (КСС) и снизить стоимость изготовления и повысить коэффициент использования материала (КИМ), но и обеспечить одновременную надежную установку волоконно-оптических и пьезоэлектрических датчиков деформации в рамках процедуры изготовления конструкции. Проведены предварительные оценки синергетического эффекта от использования такого ресурсосберегающего эко-способа для экономии материала и снижения временных и стоимостных затрат на изготовление. Целью данной работы являлось численная оценка снижения стоимости и материалоемкости элементов авиаконструкций в рамках предложенного метода изготовления перспективных композитных конструкций, сформированных на бионических принципах

В качестве объектов исследований выбраны: 1) регулярный цилиндрический отсек фюзеляжа пассажирского самолета на основе сетчатого каркаса, 2) осесимметричный металло-композитный силовой элемент, который может стать основой для создания различных легких и надежных ферменных конструкций (рис. 1).

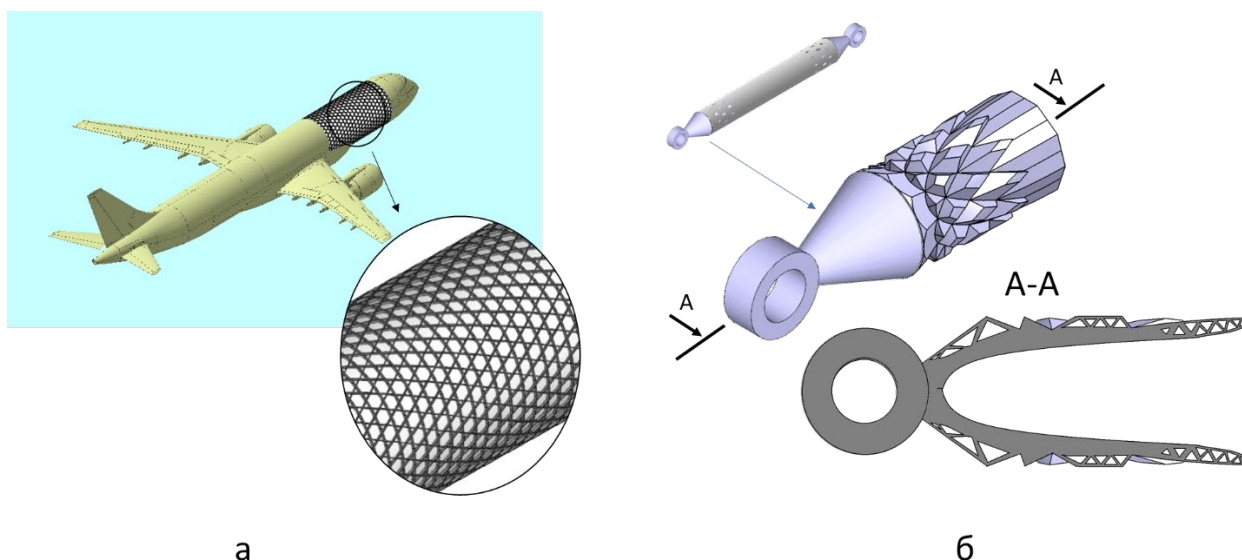


Рис. 1. — Объекты исследования: регулярный отсек фюзеляжа пассажирского самолета (а); осесимметричный металло-композитный силовой элемент (б)

Анализ возможности снижения стоимости изготовления отсека фюзеляжа пассажирского самолета производился на основе статистических данных о структуре

стоимости изготовления композитной конструкции в зависимости от количества изготавливаемых единиц, представленных в работах [1][2]. Были проанализированы возможности уменьшения стоимости изготовления про-бионической конструкции в зависимости от снижения стоимости отдельных компонентов процесса изготовления, применительно к типовому отсеку фюзеляжа пассажирского самолета.

Предложенный способ был ориентирован на намоточные процедуры изготовления. Был проведен анализ возможностей снижения стоимости каждого этапа изготовления конструкции. Показано, что за счет использования вспомогательных элементов про-бионической конструкции в качестве элементов оснастки может быть достигнуто снижения стоимости изготовления и материалоемкости самого (изготавливаемого) отсека фюзеляжа пассажирского самолета, если при этом будут обеспечены требуемые значения конструктивных параметров силовой конструкции, удовлетворяющие требованиям прочности.

Что касается способа изготовления осесимметричных силовых элементов, то при их изготовлении рассматривались современные аддитивные способы изготовления, которые могут быть единственными вариантом реализовать предложенную конструктивно-силовую схему металлических стыковочных узлов, характеризующуюся наличием полостей в конструкции узла (рис. 1). Аддитивные технологии позволяют получить высокие значения коэффициента использования материала [3]. На основе весовых оценок частей силового элемента были получены зависимости снижения материалоемкости изготовления силовых элементов от уровня нагружения и количества изготавливаемых единиц.

Также был исследован синергетический эффект влияния неизвлекаемой оснастки для намотки композитной части силового элемента на параметры локальной устойчивости его стенки. Были получены параметрические зависимости эффекта от геометрических параметров осесимметричного силового элемента.

Результаты исследований, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при формировании аванпроектов при разработке композитных конструкций, для которых критично достижение высокого весового совершенства и обеспечение надежности.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.2.5

Литература

1. Shama Rao N., Simha T.G.A., Rao K.P. and Ravi Kumar G.V.V., «Carbon composites are becoming competitive and cost effective», Infosys Limited, Bengaluru, India, 2018.
2. Aniruddha V. Joshi, «A break-down model for cost estimation of composites», Master of Science's thesis, Ohio University, 2018
3. Полькин И.С., «Аддитивные технологии титановых сплавов», Технологии легких сплавов, №3 2015.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТАДИЙНОСТИ РАЗВИТИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ, АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Банников М.В., Баяндин Ю.В., Никитюк А.С., Юрина А.Ю., Князев Н.А.

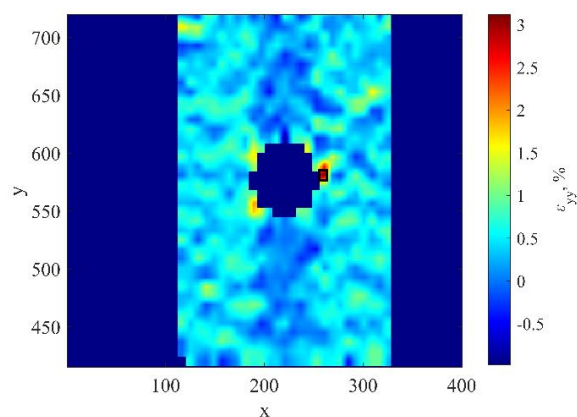
«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Прогнозирование разрушения композитов является комплексной задачей из-за сложного процесса развития повреждений, при котором прочность материала определяется коллективным поведением дефектов. Цель данной работы — установить стадийность перехода от накопления повреждений к окончательному разрушению при циклическом нагружении путем анализа интегральных структурных характеристик материала. Для мониторинга развития повреждений «in situ» была использована методика, сочетающая метод цифровой корреляции изображений (DIC) и сигналов акустической эмиссии в процессе испытаний и исследование микротомографии образцов в области концентрации напряжений. Анализ полей деформации, полученных с помощью DIC в ходе блочного циклического нагружения, позволил определить критическую стадию перехода к разрушению. Для пороговой сегментации и кластерного анализа использовались байесовские модели гауссовских смесей, которые показали, что механическое нагружение приводит к образованию отдельных кластеров мелких и крупных пор.

Испытания проводились на сервогидравлической универсальной испытательной машине BISS с частотой 1 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R=0.1$ методом ступенчатого циклического нагружения с использованием системы DIC для регистрации полей деформации (рис.1, а). Анализ фазовых портретов деформации позволил оценить влияние накопления повреждений на процесс разрушения (Рис.1, б).



а)



б)

Рис. 1. – а) Экспериментальная установка в сборе. 1- Испытательная машина; 2 – ИК камера; 3 - Осветитель, 4 – Камера для DIC, 5 – Система охлаждения, 6 – Образец, 7 – Датчики системы АЭ; б) изображение полей деформации, построенное по данным DIC в процессе циклического эксперимента.

На рисунке 2 представлено распределение пор в области концентрации напряжений а) и фазовые портреты флуктуаций поля деформаций в зоне распространения трещины. Начальная стадия сопровождается сдвигом и расширением фазовых портретов, с увеличением деформации и скорости деформирования в процессе накопления распределенных повреждений. Критический переход происходит в заключительных

блоках. Фазовый портрет заключительного 14-го блока можно разделить на две отдельные составляющие, каждая из которых связана с различными динамическими модами (аттракторами). Первый, «плотный» аттрактор, обозначает режим локализованного распространения основной трещины. Второй, проявляющийся в виде "случайного" облака точек, соответствует автомодельному решению, описывающему сингулярную временную кинетику, сопровождающуюся зарождением дочерних трещин. Дуальность аттракторов, характеризующих различную пространственно-временную динамику развития поврежденности, позволяет прогнозировать наступление критической стадии разрушения вследствие роста доминирующей области поврежденности при ее слиянии с «дочерними» очагами поврежденности

Анализ данных томографии [1] формирования областей поврежденности в присутствии концентратора напряжений привел к следующим выводам: увеличение механической нагрузки сначала приводит к росту существующих пор, а затем к зарождению новых повреждений. Вероятно, что при циклическом нагружении увеличение размера пор происходит неравномерно. Поры, расположенные в непосредственной близости друг от друга, растут наиболее интенсивно, что приводит к уменьшению расстояния между ними и их последующему слиянию в большие полости.

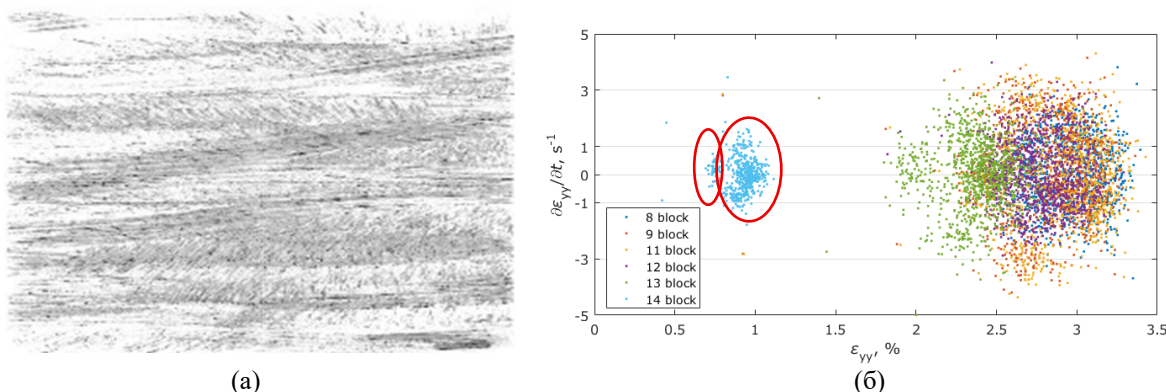


Рис. 2. – а) Распределение пор в образце в зоне концентрации напряжений (а) Фазовые диаграммы заключительных блоков нагружения. На фазовых портретах для блоков 13 и 14 наблюдается разделение общего облака точек на две отдельные части (выделены овалами), что связано с появлением нового динамического аттрактора

Разработанная мультимодальная методика [2] представляет собой эффективный инструмент для обоснования «цифровых двойников» поведения композиционных материалов авиакосмического назначения, учитывающих микроструктурные параметры, определяющих стадийность разрушению композиционных материалов.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.8.1.

Литература

1. Ignatova, A.M., Balakhnin, A.N., Bannikov, M.V., Kuper, K.E., Nikitiuk, A.S. & Naimark, O.B. (2022) Technique for obtaining an integral characteristic of the structure of a loaded composite material based on microtomographic research data. *Procedia Structural Integrity*. 41, 550–556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.063>
2. Bannikov M., Bayandin Y., Nikityuk A., Uvarov S., Naimark O. Experimental field analysis of damage-failure transition in composite material with a stress concentrator under cyclic loading (application of DIC and X-ray tomography techniques) (in print *Fracture and Structural Integrity*)

ИНВАРИАНТЫ ДЕЙСТВИЯ КАК ПАРАМЕТРЫ ОПТИМИЗАЦИИ СВОЙСТВ СПЛАВОВ АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ И УСТАЛОСТНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Наймарк О.Б., Савельева Н.В., Уваров С.В., Оборин В.А., Балахнин А.Н.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Развиты критерии оптимизации режимов ударно-волновой обработки для повышения усталостного ресурса сплавов авиационного моторостроения и ракетной техники, основанные на учете автомодельности пластических волновых фронтов и кинетики роста усталостных трещин. Показано, что закономерности автомодельности, отраженные в степенных зависимостях структурированных волновых фронтов при амплитудах ударного импульса 1-10 ГПа и скоростях деформации 10^5 - 10^9 с⁻¹, соответствуют «инвариантам действия», определяющим диссипативные свойства (stored energy) материалов, обусловленные многомасштабным развитием дефектов. Установлена связь волновых «инвариантов действия» с инвариантными параметрами, характеризующими степенную кинетику развития усталостных трещин.

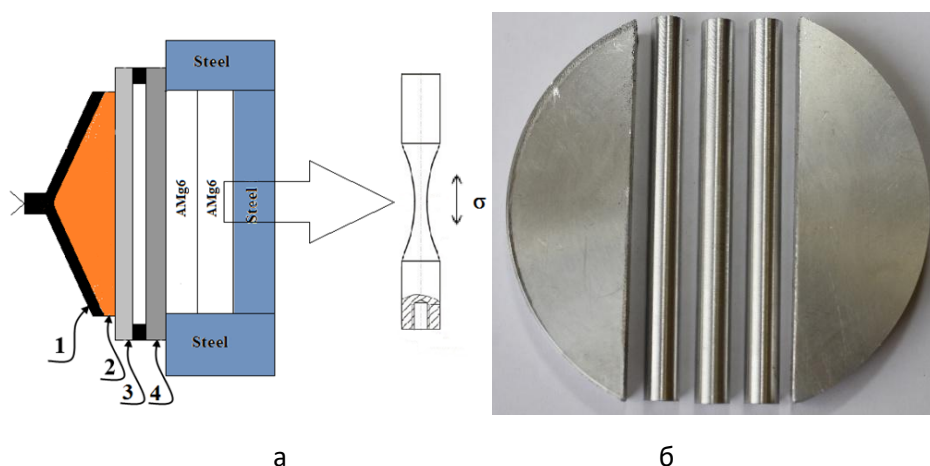


Рис. 1. - (а) Схема экспериментальной установки по ударно-волновому нагружению мишеней из сплава АМгб: 1- взрывная коническая линза; 2-парафиновая вставка; 3-стальная пластина-амортизатор удара; 4- алюминиевый ударник; (б) Фотография мишени с вырезанными образцами для проведения испытаний на сверхмногоцикловую усталость.

Применительно к обработке материалов авиационного моторостроения реализована методология полного исследовательского цикла, включающего проведение модельных экспериментов по плосковолновому нагружению образцов для усталостных испытаний и последующее изучение влияния этого воздействия на усталостные свойства образцов в сочетании с методами структурного анализа [1], Рис.1. Введение «инварианта действия», основанное на представлениях теории критических дистанций [2], позволяет описать кинетику развития усталостных трещин в материалах, подвергнутых предварительному ударно-волновому воздействию, включая зарождение и развитие малых трещин, трещин

Пэриса. Зарождение внутренней усталостной трещины определялось с помощью метода амплитудно-частотного анализа по изменению эффективных упругих свойств материала, Рис.2. Исследования на усталость проводились на испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 при уровнях напряжений от 100 до 200 МПа и симметричном цикле $R = -1$ с частотой 20 кГц. Отклонение частоты на 0,5 кГц связывалось с изменением механического импеданса образца при развитии поврежденности и предвестник разрушения при зарождении трещины с характерным размером ~ 2 мм.

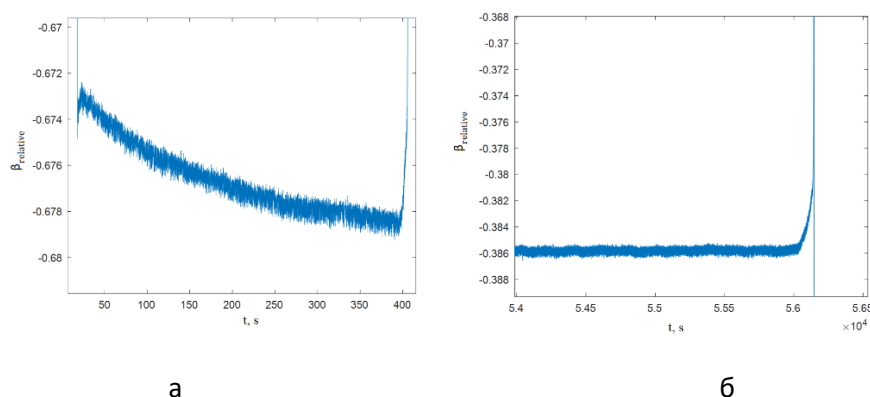


Рис. 2. - Относительный коэффициент нелинейности $\beta_{\text{relative}} = \beta/\beta_0$ (β_0 – в исходном состоянии образца) на предкритической стадии циклического нагружения образца, подвергнутого предварительному ударно-волновому нагружению: (а) $\sigma = 150$ МПа, $N_f = 3,10 \times 10^7$; (б) $\sigma = 110$ МПа, $N_f = 1,04 \times 10^9$).

Уровень приложенных напряжений позволил исследовать усталостную долговечность до значений, соответствующих 10^{10} циклам нагружения. Развита методические основы исследования поведения материалов при последовательных ударно-волновых и усталостных воздействиях для обеспечения максимального усталостного ресурса. Идентификация структурных масштабов для определения «инвариантов действия», определяющих кинетику развития усталостных трещин в материалах после ударно-волновой обработки, проведена по данным количественного фрактографического анализа с использованием данных интерферометрии поверхностей разрушения. Количественный фрактографический анализ с использованием данных интерферометрии поверхностей разрушения позволил идентификацию структурных масштабов для определения «инвариантов действия», определяющих кинетику развития усталостных трещин в материалах после ударно-волновой обработки.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.8.2.

Литература

1. Bannikov M., Oborin V., Bayandin Yu., Ledon D., Kiselkov D., Savinykh A., Garkushin G., Razorenov S., and Naimark O. Damage-failure transition under consecutive dynamic and very high cycle fatigue loads // J. Appl. Phys. 2022, Vol.131, P. 135902. <https://doi.org/10.1063/5.0085348>.
2. Naimark O. Duality of singularities of multiscale damage localization and crack advance: length variety in Theory of Critical Distances // Fracture and Structural Integrity. 2019, Vol.13, n.49, P.272-281.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКСИДНОЙ И СУЛЬФИДНО-ОКСИДНОЙ КОРРОЗИИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА С УЧЁТОМ НАПРЯЖЕНИЙ

Дудин Д.С., Келлер И.Э.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Элементы газотурбинных установок работают при экстремальных термических и механических нагрузках в агрессивной среде продуктов сгорания топлива, содержащей кислород и примеси серы [1]. В таких условиях развиваются процессы окисления и сульфидно-оксидной коррозии, что приводит к деградации физико-механических свойств поверхностного слоя материала. На поверхности формируются соединения с агрессивными компонентами газовой среды, микротрещины, зоны пористости и происходит вымывание легирующих элементов из приповерхностного слоя [2]. Эти процессы способствуют зарождению макротрещин с последующим разрушением материала при действии эксплуатационных нагрузок. Для адекватного описания кинетики и механики коррозионных процессов необходимы верифицированные многопараметрические модели, учитывающие взаимную диффузию компонентов, химические реакции, развитие деформаций и напряжений, а также эволюцию микроструктуры.

В работе рассматривается оксидная и сульфидно-оксидная коррозия жаропрочного сплава $\text{Fe}_{76}\text{Cr}_{24}$ при температуре 750°C . В модели учтено минимальное количество химических реакций для исследования слоистой структуры продуктов коррозии, наблюдаемой экспериментально. Для процесса окисления записываются две химические реакции: образование оксида железа (III) и оксида хрома (III). При моделировании сульфидно-оксидной коррозии дополнительно записывается реакция образования сульфида хрома. Термодинамические расчёты показывают возможность протекания химических реакций в прямом направлении при заданной температуре. Механизм процесса описывается следующим образом. Молекулярный кислород и молекулярная сера проникают в металл и реагируют с ионами железа и хрома, движущимися навстречу им. За счёт разных скоростей химических реакций агрессивных веществ с элементами металла на поверхности образуется слоистая структура продуктов коррозии, которая затем распространяется вглубь материала.

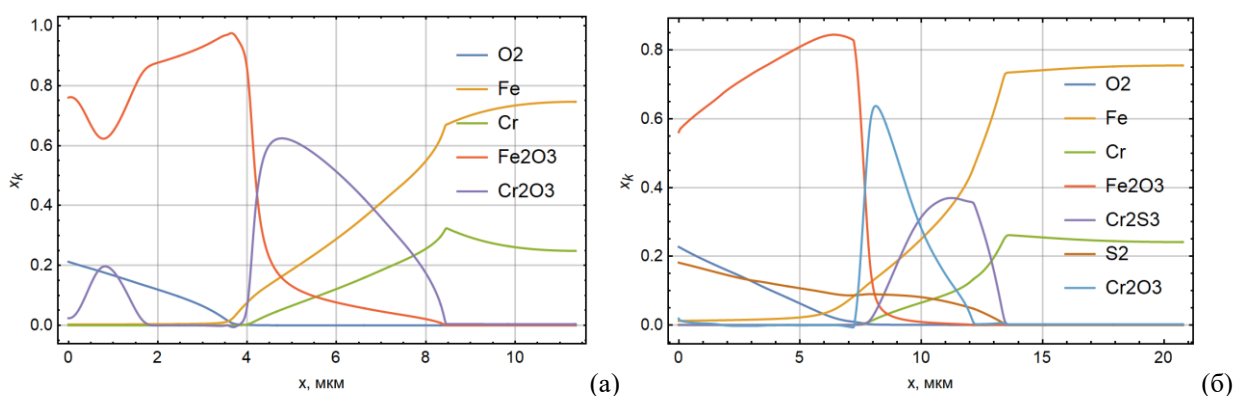


Рис. 1. - Профили массовых долей компонентов, полученные после воздействия кислорода на протяжении 500 ч. (а) и воздействия кислорода и серы на протяжении 168 ч. (б) на сплав $\text{Fe}_{76}\text{Cr}_{24}$ при 750°C .

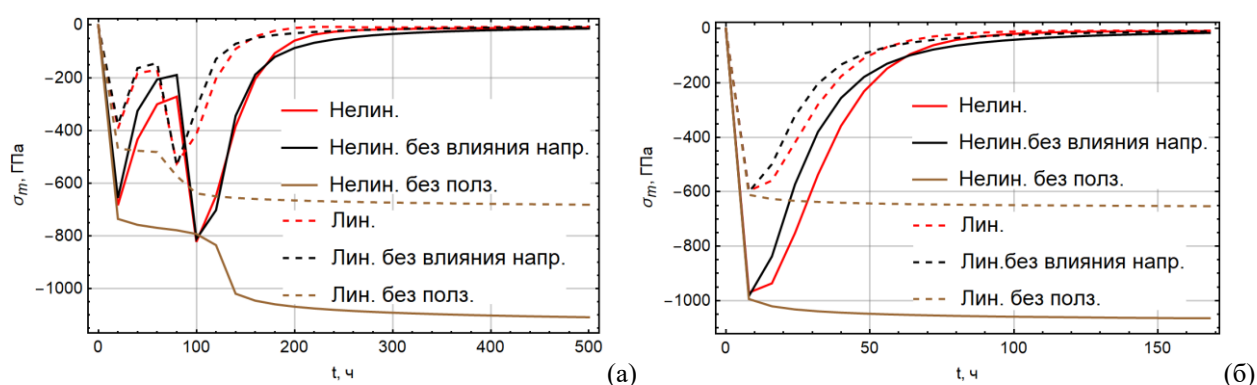


Рис. 2. - Изменение среднего значения поверхностных напряжений со временем при окислении (а) и сульфидно-оксидной коррозии (б) сплава $\text{Fe}_{76}\text{Cr}_{24}$ при 750 °С по моделям, построенным на нелинейных и линейных геометрических соотношениях, учитывающих либо не учитывающих: влияние напряжений на хемодиффузионные процессы, ползучесть.

Сформулирована модель связанных процессов взаимной диффузии и химических реакций в многокомпонентной среде с конечными вязкоупругопластическими деформациями, которая затем была адаптирована к механизмам коррозии, изложенным выше. Разработан комбинированный подход к разложению диффузионного и деформационного движения [3], который сочетает маркерную диффузионную систему отсчёта [4] и материальную конвективную скорость [5] при описании связанных процессов механо-диффузии и обладает определенными преимуществами перед материальным подходом. Показано, что модель описывает формирование слоистой структуры поверхности сплава $\text{Fe}_{76}\text{Cr}_{24}$ при 750 °С (см. рис. 1) и истощение легирующими элементами подслоя материала, что наблюдается в эксперименте [2]. Получены поля распределения напряжений, соответствующие этим структурам, в разные моменты времени (см. рис. 2) и показана необходимость учёта конечности деформаций, вязкопластических свойств продуктов коррозии и влияния напряжений на скорость взаимной диффузии и химических реакций.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.6.1.

Литература

1. Nikitin V. I., Rybnikov A. I. Sulfide-oxide corrosion of the materials and coatings of gas turbine blades // Therm. Eng. 2011. Vol. 58. № 2. P. 109-118. <https://doi.org/10.1134/S004060151102008X>
2. Ning Z., Zhou Q., Liu Z., Li N., Luo Q., Wen D. Effect of imposed stresses on high temperature corrosion behavior of T91 // Corrosion Sci. 2021. Vol. 189. P. 109595. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109595>
3. Дудин Д. С., Келлер И. Э. Обзор подходов к формулировке связанных уравнений взаимной диффузии в вязкоупругом теле // Хим. физ. мезоскопия. 2022. Т. 24. № 3. С. 296-311. <https://doi.org/10.15350/17270529.2022.3.24>
4. Brassart L., Liu Q., Suo Z. Mixing by shear, dilation, swap, and diffusion // J. Mech. Phys. Solids. 2016. Vol. 96. P. 48-64. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2017.12.008>
5. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов. М.: Мир, 1967. 544 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ АВИАЦИОННЫХ СПЛАВОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Казанцев А.Л., Смирнов С.А., Гачегова Е.А., Пойлов В.З., Келлер И.Э.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Выполнены коррозионные испытания образцов 18x18x3 мм сплавов ВТ6 и ЭИ 435 с предварительной односторонней лазерной проковкой и без нее. На исследуемую поверхность наносилось 100 мг NaCl или Na₂SO₄ в виде насыщенного раствора, образцы сушились при температуре 110°C до постоянной массы и выдерживались при температуре 900°C 1, 2, или 4 часа в муфельной печи в среде воздуха (рис. 1, а).

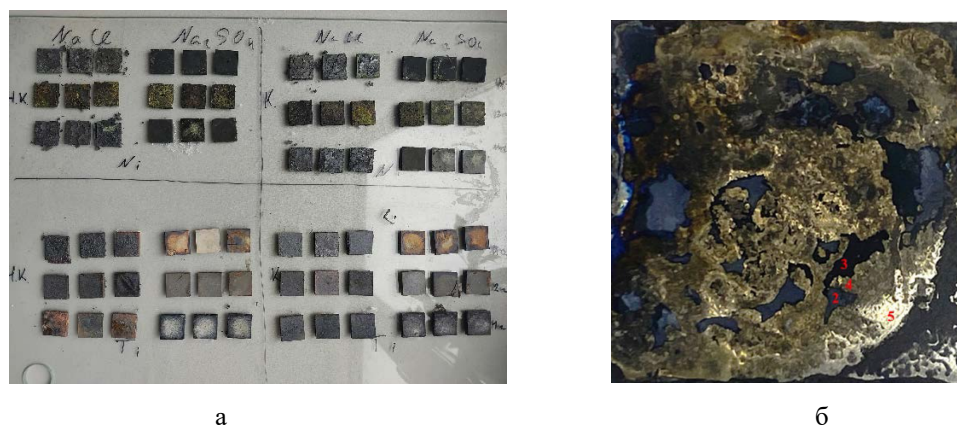


Рисунок 1 – Образцы после испытаний (а) и поверхность образца под отделившимся коррозионным слоем с областями проведения рентгеноспектрального микроанализа (б)

В образцах ВТ6 при хлоридной коррозии обнаружены следующие химические изменения. От образца отделяется коррозионный слой, толщина которого (табл. 1) растет с увеличением времени выдержки, но не обнаруживает зависимости от лазерной проковки.

Таблица 1 – Максимальная толщина отделившегося слоя для образцов ВТ6 при хлоридной коррозии

Время выдержки, ч	Толщина слоя отделившихся продуктов коррозии, мкм	
	Образцы с лазерной проковкой	Образцы без лазерной проковки
1	220	249
2	260	259
4	340	360

Морфология внешней поверхности коррозионного слоя представлена на рис. 2. Ее рентгеноспектральный микроанализ на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N также не обнаружил зависимости от лазерной проковки. Основная часть продуктов коррозии представлена пластинчатыми кристаллами (табл. 2, внешний слой), состоящими из оксидов компонентов сплава Ti, V и Al, что подтверждается данными [1]. Также на поверхности присутствуют кубические кристаллы коррозионного агента NaCl (табл. 2, внешний слой, куб) и призматические кристаллы TiO₂ (рис. 2, в, г, табл. 2, внешний слой, призма), образующиеся после выдержки в печи при 900°C в течение двух часов. С увеличением времени выдержки происходит рост кристаллов и их уплотнение (рис. 1, д, е).

Состав поверхности под отделившимся коррозионным слоем представлен оксидами Ti, Al, V (рис. 1, б, область 1) и образующимся в условиях уменьшения соотношения парциальных давлений кислорода к азоту TiN (рис. 1, б, область 2) [2]. Сплав под продуктами коррозии (табл. 2, шлиф) обеднен титаном, являющимся основным и самым активным участником процесса высокотемпературной солевой коррозии.

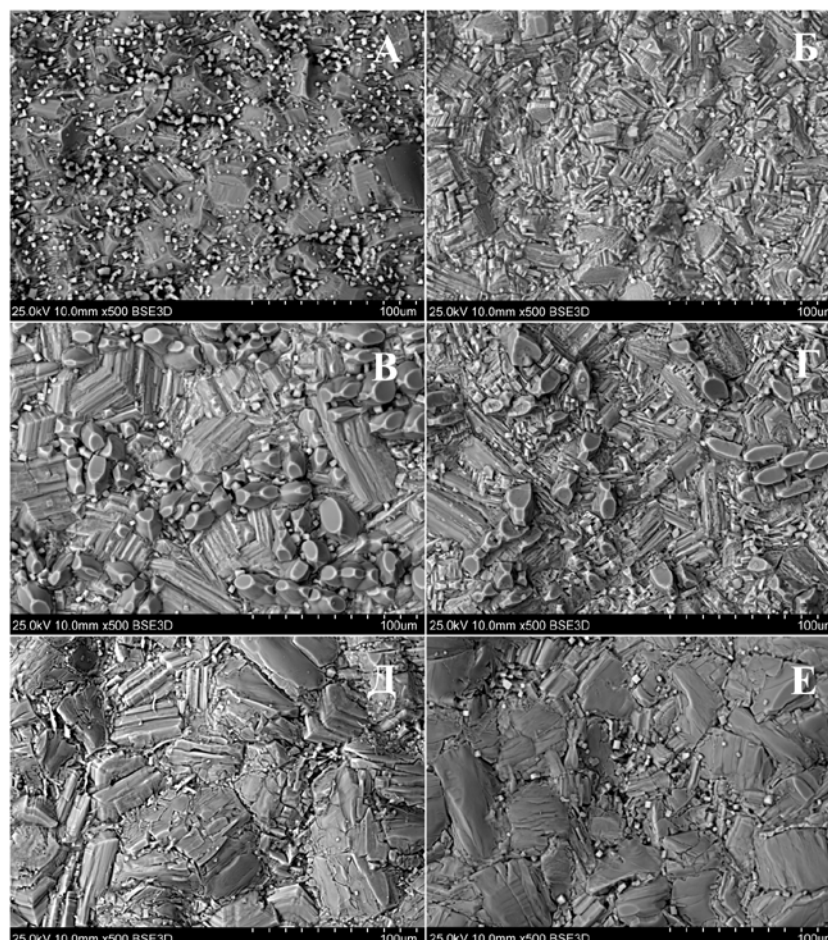


Рисунок 2 – Микрофотографии поверхности коррозионного слоя (увеличение 500X) образцов: а, в, д – с лазерной проковкой, б, г, е – без нее; а, б – выдержка 1 час, в, г – выдержка 2 часа, д, е – выдержка 4 часа

Таблица 2 – Данные рентгеноспектрального микроанализа после выдержки в течение 2 ч для образцов ВТ6 при хлоридной коррозии

Область анализа	Лазерная проковка	Концентрация, % масс.						
		N	O	Na	Al	Cl	Ti	V
Внешний слой	-	-	29,15	3,56	0,29	1,69	62,03	3,28
	+	-	31,12	2,60	0,52	-	63,61	2,15
Внешний слой, призма	-	-	50,04	-	-	-	49,96	-
	+	-	33,90	-	0,28	-	65,83	-
Внешний слой, куб	-	-	9,74	36,74	0,49	36,04	7,47	9,51
	+	-	-	-	-	-	-	-
Область 1	-	-	46,22	-	31,29	0,02	21,58	0,89
	+	не проводился						
Область 2	-	6,57	12,51	-	0,33	0,80	79,21	0,58
	+	5,71	14,09	-	0,79	2,30	71,98	5,12
Шлиф	-	-	-	-	11,09	0,32	76,41	12,18
	+	-	-	-	9,04	0,71	82,44	7,82

В целом собранные первичные данные анализа поверхностей образцов обоих исследованных сплавов и обоих коррозионных сред говорят о слоистой структуре коррозионного слоя и о необходимости анализа химического состава по толщине поперечного сечения с помощью шлифов, что будет являться целью следующего этапа работы.

Для исходных и испытанных образцов определялось распределение по глубине вблизи исследуемой поверхности тангенциальных компонент остаточных напряжений, для чего использован метод сверления отверстий с тензометрированием поверхности согласно стандарту ASTM E837 на установке MTS3000-Reston. Данные, приведенные на рис. 3, показывают, что наведенные лазерной проковкой остаточные напряжения около 400 МПа практически полностью релаксируют за 4 часа при термохимическом воздействии.

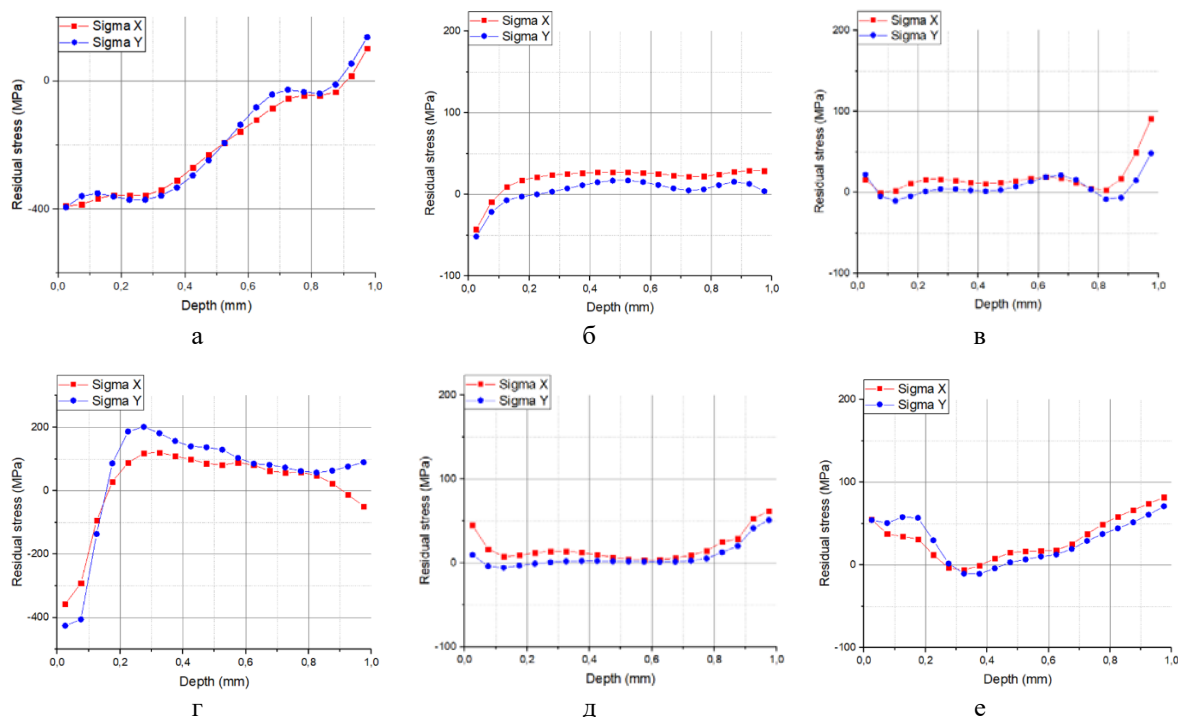


Рисунок 3 – Распределения остаточных напряжений вблизи поверхности образцов, подвергнутой лазерной проковкой: а, б, в – ВТ6, г, д, е – ЭИ 435; а, г – до испытаний, б, д – выдержка 4 часа в среде NaCl, в, е – выдержка 4 часа в среде Na₂SO₄

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.6.1.

Литература

1. Anuwar M., Jayaganthan R., Tewari V.K., Arivazhagan N. A study on the hot corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy. Materials Letters. 2007. Vol. 61, No. 7. P. 1483 – 1488. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.07.058>.
2. Заварзин С.В., Дуюнова В.А., Фомина М.А. Высокотемпературная коррозия титановых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 03. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-4-27-39>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СКЛОННОСТЬ К НАВОДОРАЖИВАНИЮ И КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА ВТ6

Изюмова А.Ю., Ложкин Д.В., Кудряшев И.С., Вережак М.В., Угольников М.В.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Лазерная ударная обработка (ЛУО) применяется не только для повышения усталостной долговечности материалов за счёт создания поля сжимающих остаточных напряжений (ОН), но и для увеличения коррозионной стойкости деталей и конструкций [1, 2]. С физической точки зрения, ЛУО представляет собой сложный процесс, сопровождающийся рядом физических эффектов, одним из которых может являться наводораживание обрабатываемой поверхности [3]. Его возникновение возможно вследствие разложения паров воды, используемой в качестве ограничивающего слоя при ЛУО, под действием высокоэнергетической лазерной плазмы и ультрафиолетового излучения. Образовавшиеся ионы водорода (протоны), обладая высокой подвижностью, способны внедряться в кристаллическую решётку материала. Этот процесс интенсифицируется в условиях ударного нагружения, которое генерирует множество дефектов структуры (дислокаций, вакансий), служащих эффективными ловушками для водорода. Вероятность проявления данного эффекта невелика при стандартных параметрах ЛУО, однако риск существенно возрастает при использовании в качестве ограничивающей среды кислотных или щелочных растворов вместо воды, применении органических покрытий, а также при обработке материалов, склонных к наводораживанию, таких как титановый сплав ВТ6.

В данном исследовании плоские образцы из титанового сплава ВТ6 толщиной 3 мм были подвергнуты ЛУО со следующими параметрами: энергия импульса – 1 Дж, длительность импульса – 10 нс, плотность мощности – 10 ГВт/см², форма пятна – квадрат со стороной 1 мм. Обработка проводилась безынтервальным методом с расположением пятен встык. В качестве абляционного слоя использовалась алюминиевая фольга толщиной 80 мкм, водная среда выполняла функцию ограничивающего слоя. Измерение остаточных напряжений до и после коррозионных испытаний выполнялось полуразрушающим методом сверления отверстий с использованием автоматизированной системы MTS3000-Restan.

Проведено экспериментальное исследование влияния ЛУО на склонность к водородному охрупчиванию и коррозионное поведение в условиях высоких температур. Для верификации гипотезы о наводораживании поверхностного слоя, индуцированном ударно-волновым воздействием, применялся комплекс методов: прямое измерение концентрации водорода методом вакуум-нагрева с последующей хроматографией, а также косвенная оценка посредством сравнительного анализа диаграмм деформирования образцов в исходном состоянии и после ЛУО. Согласно данным, представленным в таблице 1 и на рисунке 1, проведенная ЛУО не привела к статистически значимому увеличению концентрации водорода в поверхностном слое исследуемого материала. Следовательно, эффект водородного охрупчивания явно не проявляется, что подтверждается сохранением пластических характеристик материала.

Табл. 1. Результаты исследования степени наводораживания поверхности после обработки

Тип ЛУО	Q ₆₀₀ , ppm	Q ₇₅₀ , ppm	Σ Q, ppm
Базовый материал	14,22	5	19,22
ЛУО с фольгой	14,13	5,7	19,83

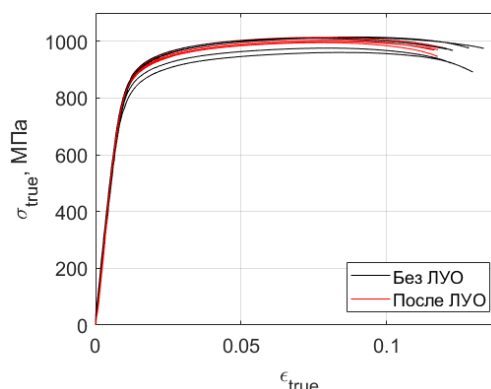


Рис. 1. – Диаграмма деформирования плоских образцов из титанового сплава ВТ6 без ЛУО и после ЛУО в описанном режиме

На основе анализа данных предложен возможный сценарий влияния сжимающих ОН, формируемых при ЛУО, на кинетику высокотемпературной коррозии. Испытания проводились в расплавах сульфата натрия (Na_2SO_4) и хлорида натрия (NaCl) при температуре 900°C с выдержкой 1, 2 и 4 часа. Несмотря на релаксацию ОН под термическим воздействием, на начальной стадии коррозионного процесса они могут оказывать стабилизирующий эффект. Предположительно, это связано с их способностью компенсировать термические напряжения, тем самым тормозя растрескивание тонкой оксидной пленки. Такой механизм мог бы объяснить наблюдаемое замедление проникновения агрессивных реагентов к поверхности материала на ранних этапах испытаний.

Помимо этого, ЛУО может способствовать измельчению зерна и увеличению плотности границ, что, с высокой долей вероятности, влияет на диффузионные процессы. Можно предположить, что увеличенная плотность границ зерен создаёт сеть предпочтительных путей для ускоренной диффузии атомов титана. Это, в свою очередь, может способствовать более быстрому формированию сплошной оксидной пленки на основе TiO_2 , что потенциально повышает коррозионную стойкость в начальный период воздействия.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.6.2.

Литература

1. Zhu J., Wang Z., Wang C., Luo K., Lu J. Significant improvement in hot corrosion resistance of Inconel 690 by laser shock peening // Surf. Coat. Technol. 2024. Vol. 492. P. 131202. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131202.
2. Li W., Yu C., Huang W., Ni S., Yu L., Zhu S., Chen J., Chen A., Chen H., Zhang S., Huang L., Hu S. Improved corrosion resistance of AISI 321 steel to molten Al-Si alloy by aluminizing and laser shock peening // Eng. Fail. Anal.. 2023. Vol. 146. P. 107144. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107144.
3. Полянский В.А., Беляев А.К., Полянский А.М. и др. Водородная хрупкость как результат поверхностных явлений при деформации металлов // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25. № 3. С. 27–37. DOI: 10.55652/1683-805X_2022_25_3_27.

ВЛИЯНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО АНТИФРИКЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО МОДИФИКАТОРА НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС МДО ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Торская Е.В., Хади А.А., Малышев В.Н., Буковский П.О., Муравьева Т.И.,
Щербакова О.О.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Московский государственный строительный университет (НИУ)

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

Микродуговое оксидирование (МДО) является распространенным способом создания на поверхности алюминиевых сплавов износостойких покрытий, устойчивых к коррозии. Материал покрытий, формируемых методом МДО, по своим характеристикам относится к разряду композиционных керамических материалов. Добавление антифрикционного модификатора непосредственно в электролит позволяет получать МДО-покрытия с улучшенными прочностными свойствами (в том числе износостойкостью) за счет заполнения пор модификатором, в том числе антифрикционными полимерами [1,2]. Целью данной работы является изучение влияния количества мелкодисперсного полимерного модификатора на трение и износ МДО покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве Д16.

Для исследования использовали образцы в виде дисков из деформируемых алюминиевых сплавов Д16. Были подготовлены пять серий образцов для формирования покрытий методом МДО в электролите с содержанием различного количества фторопластового порошка «Форум» (производства компании «Владфорум», г. Владивосток). Базовый электролит готовился путем последовательного разведения в дистиллированной воде необходимого количества едкого кали (КОН) и жидкого стекла ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) из расчета 2 г/л КОН и 9 г/л ЖСТ. Далее к базовому электролиту добавлялась суспензия, подготовленная путем смешивания расчетного количества фторопластового порошка «Форум» в изопропиловом спирте с добавлением Синтанола ДС-10 (0,5, 1, 2, 3, 6 г/л суспензии).

Методом инструментального индентирования на сканирующем нанотвердомере «НаноСкан-4D» (ТИСНУМ, Россия) были получены кривые зависимости внедрения от приложенной силы в цикле нагружения–разгрузки в упругой области. Тесты проводились при линейном нагружении до 500 мН сфероконического корундового наконечника с радиусом закругления 65 мкм в локальную торцевую область покрытий на подготовленных срезах образцов (не менее 5 тестов).

Эксперимент на трение и износ проводился на трибометре MFT-5000 (Rtec, США) по стандартной методике в соответствии с ASTM G99-23 по схеме шар – диск. В ходе теста реализуется однонаправленное сухое скольжение шарика из карбида кремния (диаметр 10 мм) по поверхности образцов (рисунок 1) при постоянной нагрузке $F = 10 \text{ Н}$ и линейной скорости $V = 0,1 \text{ м/с}$. Путь трения составляет 1000 м, а время испытания – 10000 с. Для обеспечения повторности и увеличения полезной площади образцов кроме стандартного радиуса дорожки трения, который равен 16 мм, были также проведены тесты с радиусом трека 12 мм для каждого образца. При этом варьировался параметр угловой скорости для сохранения постоянной линейной скорости.

На оптическом профилометре S neox 3D (Sensofar, Испания) были получены оптические изображения дорожек трения (объектив 20X) и пятен контакта контртела. На рисунке 1 (а) в качестве примера приведены профилограммы износа дорожки трения для образца с содержанием 1г/л суспензии в электролите. Исследование структуры образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе Quanta 650 (FEI, США), оснащенном аналитическим оборудованием EDAX, в том числе энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализатором (EDS), при ускоряющем напряжении 20 кВ. Поверхность образцов с МДО покрытиями изучали как в исходном состоянии, так и после трибологических испытаний. На рисунке 1 приведены СЭМ изображения дорожек трения для образцов с минимальным и максимальным количеством суспензии в электролите.

Установлено, что введение модификатора в электролит при формировании МДО-покрытий приводит к появлению в покрытиях антифрикционной добавки и снижению коэффициента трения. При этом количество полимера не находится в четкой корреляции с количеством модификатора в электролите. Наибольшее из рассмотренных количество модификатора приводит к дефектности поверхностного слоя и его разрушению при трении. Зависимость объемного износа от концентрации добавок имеет нелинейный характер: наблюдается уменьшение при увеличении концентрации до 3 г/л. Следовательно, для данных условий фрикционного контакта существует оптимальная концентрация модификатора, обеспечивающая снижение трения, при этом не приводящая к критическому увеличению пористости покрытия и, как следствие, к повышенному износу. Важным результатом является также наличие антифрикционной добавки в подповерхностных слоях покрытия, что приводит к стабильному значению коэффициента трения в процессе изнашивания.

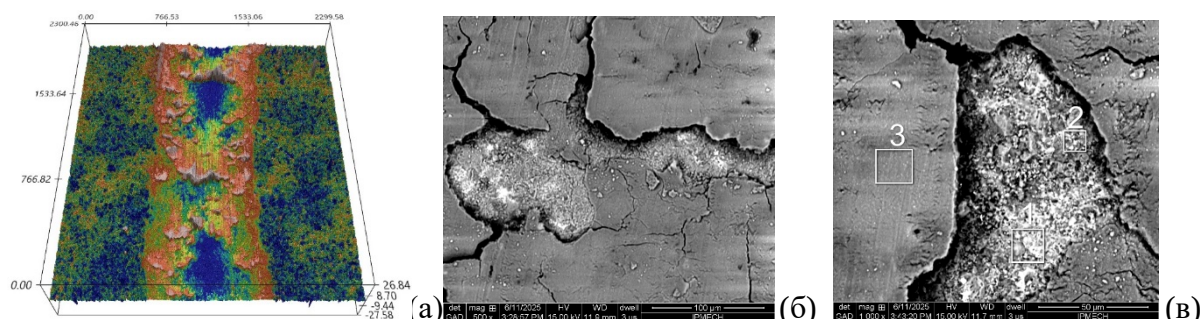


Рис. 1. - Профилограмма дорожки трения после испытания (а) и СЭМ изображения поверхностей дорожек трения образцов с минимальным (б) и максимальным (в) количеством суспензии в электролите

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.6.3.

Литература

1. Ren L, Wang T, Chen Z, Li Y, Qian L. Self-Lubricating PEO–PTFE Composite Coating on Titanium // Metals. 2019. Vol. 9. № 2. P. 170. . <https://doi.org/10.3390/met9020170>
2. Liu L, Wang L, Pan J, Wu Z, Ye Z, Wang C. Influence of ceramic coating pores on the Tribological performance of PEO–PTFE composite coatings on the Ta–12W alloy // Surface and Coatings Technology. 2022. Vol. 441. P. 128592. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128592>

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И НАЛИЧИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Горячева И.Г., Яковенко А.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Циклический характер нагружения тел является причиной интенсивного накопления поврежденности в подповерхностных слоях материалов и их последующее разрушение по усталостному механизму. Избежать усталостного износа тел при их фрикционном взаимодействии невозможно, но существуют способы снижения скорости накопления поврежденности, в частности, путем наведения в материалах тел полей остаточных напряжений. В данной работе построена математическая модель для анализа влияния остаточных напряжений, а также поверхностного абразивного износа на скорость накопления усталостных повреждений в материалах упругих тел при их относительном скольжении.

1. Постановка задачи. В работе рассматривается скольжение с постоянной линейной скоростью V , направленной по оси x , бесконечного упругого цилиндра (1) по упругой полуплоскости (2) из того же материала (рис. 1). Для решения вводится подвижная система координат (x, z) , связанная с движущимся цилиндром. Контактирующая поверхность цилиндра может быть описана функцией $f(x) = x^2/(2R)$ (R – радиус цилиндра). Износоконтактная задача рассматривается в плоской квазистатической постановке.

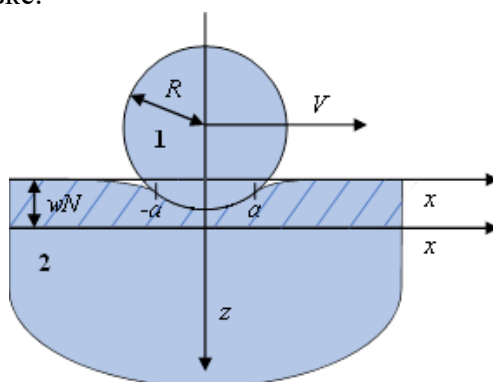


Рис. 1. – Схема скольжения упругого цилиндра по упругому основанию

В области контакта $(-a, a)$ цилиндра с полуплоскостью выполняется закон трения Кулона-Амонтона, связывающий нормальные p и касательные q контактные напряжения через коэффициент трения скольжения μ , а именно $|q(x)| = \mu p(x)$.

2. Метод решения. Вследствие предположения, что модули Юнга E и коэффициенты Пуассона ν материалов цилиндра и полуплоскости совпадают, касательные контактные напряжения не влияют на распределение контактных давлений. Тогда для нахождения нормальных напряжений в области контакта можно воспользоваться теорией Герца [1], а именно

$$p(x) = \frac{E'}{2R} \sqrt{a^2 - x^2}, \quad |x| \leq a,$$

где $E' = E / (2(1 - \nu^2))$, $a = \sqrt{4RP / (\pi E')}$, а P – нагрузка, приложенная к цилиндру.

Касательные напряжения при этом определяются из закона трения Кулона-Аматона.

Найденные контактные напряжения p и q затем используются для определения внутренних напряжений в упругой полуплоскости ($z \geq 0$), используя принцип суперпозиции.

Предполагается, что в полуплоскости также действуют остаточные напряжения σ_x^{res} (растягивающие или сжимающие) не зависящие от времени и координаты x , а зависящие только от расстояния от поверхности полуплоскости, то есть координаты z . Влиянием преднапряженного состояния полуплоскости на решение контактной задачи пренебрегается.

3. Моделирование накопления поврежденности. Для моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в материале полуплоскости при скольжении по ней упругого цилиндра используется макроскопический подход [2]. Этот подход подразумевает построение функции поврежденности Q , достижение которой критического значения в определенной точке полуплоскости определяет место и момент разрушения материала. Скорость накопления поврежденности может зависеть от многих факторов, в частности, от некоторых критериальных напряжений. В данной работе в качестве критериальных напряжений рассматриваются амплитудные значения напряжений фон Мизеса $\Delta\sigma_{VM}$ и предполагается, что скорость накопления поврежденности связана с ними степенной зависимостью. Тогда, с учетом независимости напряженного состояния полуплоскости от времени, получим следующее выражение для накопленной за N циклов поврежденности полуплоскости на глубине z :

$$Q(z, N) = Nc \left(\frac{\Delta\sigma_{VM}(z)}{p_0} \right)^m + Q_0(z),$$

где c и m – параметры модели, определяемые экспериментально, p_0 – максимальное контактное давление, а Q_0 – это начальная поврежденность в материале полуплоскости. Эта формула записана в предположении, что положение границы полуплоскости до начала подповерхностного разрушения фиксировано. Однако в процессе фрикционного взаимодействия одновременно с процессом накопления контактно-усталостных повреждений может протекать и процесс поверхностного абразивного износа, непрерывно меняющего положение границы полуплоскости.

Для описания абразивного износа в работе используется уравнение износа Арчарда [3], исходя из которого, получено выражение для глубины абразивно изношенного слоя за один цикл нагружения, а именно $w = KP/H$, где H – твердость материала, а K – некоторый безразмерный коэффициент, определяемый конкретным механизмом изнашивания. Глубина абразивно изношенного слоя определяет положение границы полуплоскости после каждого цикла нагружения, что приводит к следующему выражению для накопленной за N циклов поврежденности с учетом абразивного износа:

$$Q(z, N) = \frac{c}{p_0^m} \sum_{n=1}^N \left(\Delta\sigma_{VM}(z - w(n-1)) \right)^m + Q_0(z), \quad z \geq wN.$$

4. Численные расчеты функции поврежденности. Для определенности при расчетах рассмотрено поле постоянных растягивающих и сжимающих остаточных напряжений, которые действуют в подповерхностном слое некоторой толщины. Расчеты проводились как с учетом, так и без учета абразивного изнашивания материала

скользящим по его поверхности цилиндрическим телом. Проведен анализ влияния остаточных напряжений и изнашивания на распределение внутренних напряжений в полуплоскости, а также на накопления контактно-усталостных повреждений в ней.

На рис. 2 представлены функции поврежденности после различного числа циклов N нагружения при отсутствии остаточных напряжений в полуплоскости (рис. 2а) и наличии поля сжимающих остаточных напряжений (рис. 2б) с учетом и без учета абразивного поверхностного износа. Из результатов следует, что сжимающие остаточные напряжения приводят к снижению поврежденности материала. При этом в отсутствие абразивного износа сжимающие остаточные напряжения увеличивают поверхностные значения функции поврежденности. Учет же абразивного износа (рис. 2б) может сделать функцию поврежденности монотонно убывающей с максимумом на изношенной поверхности упругой полуплоскости. Таким образом, в условиях абразивного износа разрушение по усталостному механизму также протекает с поверхности материала, увеличивая скорость его поверхностного износа.

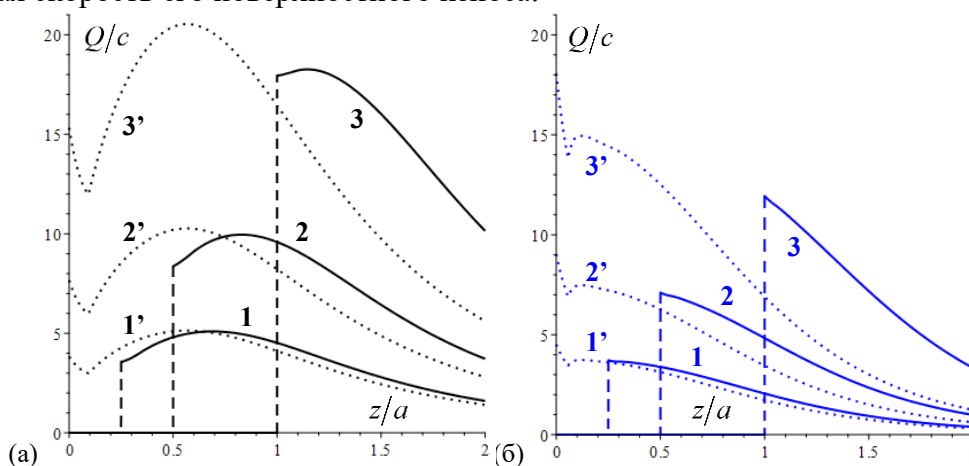


Рис. 2. – Зависимость функции поврежденности от глубины при отсутствии (а) и наличии (б) сжимающих остаточных напряжений $\sigma_x^{res} = -0.1p_0$ после $N = 25$ циклов (1,1'), $N = 50$ циклов (2,2'), $N = 100$ циклов (3,3') с учетом (1,2,3) и без учета (1',2',3') поверхностного абразивного износа; $\nu = 0.3$, $\mu = 0.2$, $m = 3$, $w = 0.01a$

5. Выводы. Проведенное исследование позволяет разработать способы управления характером изнашивания поверхности в условиях циклических нагрузок. Получено, что сжимающие остаточные напряжения могут снизить поврежденность материала, а в условиях протекания одновременно и абразивного износа сделать функцию поврежденности монотонно убывающей. Полученные результаты позволят повысить эффективность способов управления износом фрикционно контактирующих тел путем создания в них полей остаточных напряжений.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.6.4.

Литература

1. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Москва: Мир, 1989. 512 с.
2. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. Москва: Наука. 2001. 478 с.
3. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces // Journal of Applied Physics. 1953. Vol. 24. P. 981-988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>

РЕШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ОБ УСТАНОВИВШЕМСЯ СКОЛЬЖЕНИИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕЛЬЕФА ПО ПОВЕРХНОСТИ ВЯЗКОУПРУГОГО ОСНОВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ АДГЕЗИОННОГО ПРИТЯЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ПРЕДЫСТОРИИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Цуканов И.Ю., Любичева А.Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

При скольжении тела с поверхностным рельефом по вязкоупругому телу неизбежно возникает деформационная составляющая силы трения за счет асимметрии распределения контактного давления. В дополнение к перераспределению контактных давлений силы адгезионного притяжения/отталкивания различной природы могут существенно менять картину фрикционного взаимодействия вязкоупругих тел. В таком случае представляет интерес исследовать влияние предыстории контактного нагружения поверхностей, обусловленное действием нескольких физических механизмов, на контактные характеристики. Среди механизмов влияния можно выделить два основных:

1. Влияние фазы статического нагружения до начала скольжения (предварительное смещение). В период трения покоя происходит взаимодействие выступов микрорельефа при постоянной вертикальной нагрузке и увеличивающемся относительном горизонтальном смещении (нагрузке), что с точки зрения механики контактного взаимодействия является процессом частичного проскальзывания. При этом скорость нагружения обычно мала, что позволяет считать взаимодействующие тела упругими. Наличие и постепенный рост адсорбционных пленок и загрязнений на предварительно сжатых поверхностях приводит к изменению величины адгезионной составляющей силы горизонтальному смещению в зависимости от времени в контакте поверхностей.

2. Влияние фрикционного разогрева при скольжении. Повышение температуры увеличивает энергию колебаний атомов на поверхности, и в конечном итоге адгезионные связи разрушаются. Таким образом, вторым механизмом влияния предыстории контактного взаимодействия при скольжении тел с учетом сил адгезии является фрикционный разогрев, существенно зависящий от скорости скольжения.

В данной работе будет рассмотрена контактная задача, постановка которой соответствует первому физическому механизму, а также метод ее решения.

1. Влияние параметров адгезионного взаимодействия на предварительное смещение тел с поверхностным рельефом и силу трения скольжения. Рассмотрим плоскую контактную задачу для системы гладких параболических выступов радиусом R и слоя вязкоупругого материала, ограниченного плоской поверхностью, находящихся под последовательным действием вертикальной нагрузки P и горизонтального смещения $\delta_x = Vt$, где t – время, $V = \text{const}$ – скорость смещения индентора. В зазоре между поверхностями действуют силы межмолекулярного притяжения, направленные по вертикали. Индентор предполагается недеформируемым, его форма определяется функцией

$$f(x) = x^2 / 2R. \quad (1)$$

В предположении, что толщина вязкоупругого материала H мала по сравнению с характерными размерами выступов, то поведение вязкоупругого основания опишем упрощенной моделью, при этом периодическая задача эквивалентна задаче для единичного индентора. Так как скорость горизонтального смещения индентора мала, то влиянием реологии деформируемого материала можно пренебречь и считать слой упругим основанием, обладающим нормальной и тангенциальной податливостью [1] и оказывает сопротивление, как вертикальному внедрению, так и горизонтальному смещению.

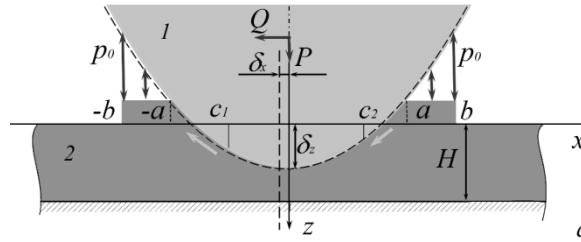


Рис. 1. – Схема контакта: 1 – выступ текстурированной поверхности; 2 – упругое основание.

Горизонтальные $u_x(x)$ и вертикальные $u_z(x)$ перемещения основания связаны с горизонтальными $p_x(x)$ и вертикальными $p_z(x)$ усилиями линейными соотношениями:

$$p_x(x) = k_x u_x(x); \quad p_z(x) = k_z u_z(x). \quad (2)$$

Для связи граничных условий с уравнениями равновесия вертикальные и горизонтальные реакции основания в точке $p_x(x)$ и $q_x(x)$ спроецированы на два направления: нормальное и касательное к поверхности единичного индентора [1].

При горизонтальном смещении системы инденторов силы трения действуют в направлении касательной к его профилю. В зоне контакта $2a$ определены подобласти проскальзывания и сцепления (см. рис. 1). Касательные усилия $q(x)$ в подобластях проскальзывания определяются усилиями трения согласно закону Кулона:

$$q(x) = -q_0 + \mu p(x), \quad |c_{1,2}| \leq |x| < |a|, \quad (3)$$

где $p(x)$ – контактные давления; μ – локальный коэффициент пропорциональности касательных и нормальных усилий в точке на криволинейной поверхности индентора, q_0 – постоянные тангенциальные напряжения, возникающие в зонах проскальзывания вследствие наличия сопротивления молекулярных связей разрыву при горизонтальном смещении. Параметр q_0 в общем случае зависит от скорости приложения нагрузки, в данной работе он принят постоянным.

Уравнения равновесия в вертикальном и горизонтальном направлениях имеют вид:

$$P = k_z \int_{-b}^b u_z(x) dx, \quad Q = k_x \int_{-a}^a u_x(x) dx. \quad (4)$$

Действие межмолекулярных сил описывается кусочно-постоянной аппроксимацией потенциала Леннарда-Джонса согласно модели Можи-Дагдейла [2].

$$\begin{aligned} p(x) &= -p_0, & a < x \leq b; \\ p(x) &= 0, & x > b; \end{aligned} \quad (5)$$

$$h_0 = h(b) = \frac{w}{p_0},$$

где p_0 , w – максимальная удельная сила адгезии и удельная энергия адгезии соответственно, b граница области действия сил адгезии, $h(x)$ – функция зазора в вертикальном направлении.

2. Решение задачи и определение силы трения. Общее решение задачи существует при выполнении неравенства

$$\frac{q_0}{\sqrt{1+\mu^2}} \leq \sqrt{(k_x^2 u_x(x)^2 + k_z^2 u_z(x)^2)}, \quad (6)$$

Из неравенства выше и граничных условий следует, что $q_0 \leq \mu p_0$. В предельном случае имеем $q_0 = \mu p_0$.

Решение системы уравнений и граничных условий для параболической формы выступов приводит к следующим выражениям для вертикальной и горизонтальной сил:

$$P = \frac{4\sqrt{2Rk_z}}{3} \left(\delta_z + \frac{p_0}{k_z} \right)^{3/2} + 2\sqrt{2R}p_0 \left(\delta_z + \frac{p_0}{k_z} \right)^{1/2} - 2\sqrt{2R}p_0 \left(\delta_z + \frac{w}{p_0} \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$Q = k_x \left(\int_{-a}^{c_1} u_x(x) dx + \delta_x (c_2 - c_1) + \int_{c_2}^a u_x(x) dx \right),$$

где горизонтальные смещения в области проскальзывания определяются выражением

$$u_x(x) = \frac{-k_z x^3 - \mu k_z R x^2 + 2\delta_z k_z R x + 2\mu \delta_z k_z R^2}{2k_x R (R - \mu x)}, \quad \text{sgn}(c_{1,2})c_{1,2} \leq |x| < a. \quad (8)$$

Для определения границ подобласти сцепления $c_{1,2}$ используется уравнение

$$c^3 + \mu R c^2 + \frac{2R\mu p_0}{k_z} \sqrt{R^2 + c^2} - 2R \left(\frac{k_x}{k_z} \mu \delta_x + \delta_z \right) c + 2R^2 \left(\frac{k_x}{k_z} \delta_x - \mu \delta_z \right) = 0 \quad (9)$$

Максимальная касательная сила Q при которой происходит переход к скольжению определяется при значении горизонтального смещения $\delta_{x\max}$, соответствующем нулевой области сцепления $c_1 = c_2$. Для определения $\delta_{x\max}$ в работе получено выражение $\delta_x^{\max} = (\mu k_z \delta_z + q_0) / k_x$. При этом значение силы Q оказывается больше силы трения скольжения, которая определяется формулой $Q_{sl} = 2aq_0 + \mu P$. Если q_0 при предварительном смещении будет зависеть от скорости скольжения, т.е. величины δ_x , то это окажет влияние и на силу трения скольжения, особенно при возвратно-поступательном движении.

5. Выводы. В работе представлена модель взаимодействия тела с поверхностным рельефом и вязкоупругого слоя в условиях предварительного смещения и полного скольжения, с учетом действия сил трения по касательной к искривленной поверхности выступов рельефа и сил адгезии в зазоре между поверхностями в рамках двучленного закона Кулона и модели Можи-Дагдейла. Результаты показывают, для искривленной поверхности выступа, механическая и адгезионная составляющие силы сопротивления горизонтальному смещению взаимосвязаны и усиливают друг друга, приводя к значительному превышению результирующей касательной силы относительно значения силы трения скольжения. Проведенное исследование позволяет разработать способы управления силой трения поверхностей с рельефом при переходе от трения покоя к трению скольжения с учетом фрикционных и адгезионных свойств контактирующих тел.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.6.5.

Литература

1. Lyubicheva, A.N., Tsukanov, I.Y. The influence of 2D periodic surface texture on the partial slip problem for elastic bodies // European Journal of Mechanics - A/Solids. 2022. Vol. 91. 104405

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

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВТОРНОЙ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ КАЛИЙНЫХ РУД ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Бельтюков Н.Л., Паньков И.Л., Ударцев А.А.

«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Ранее на некоторых участках Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) в качестве одного из способов управления горным давлением применялась камерная система разработки с оставлением "податливых" междукammerных целиков. Исследовательские выработки, пройденные спустя несколько лет после отработки таких участков, позволили изучить состояние отработанного пространства [1]. В результате установлено, что очистные камеры на пласте АБ – частично, а на пласте КрII – полностью погашены вследствие деформирования целиков под действием горного давления. По крайней мере во втором случае можно утверждать, что сформировался непрерывный вторичный природно-техногенный пласт КрII*. Достаточная вынимаемая мощность и приемлемые прочностные свойства природно-техногенного пласта создают предпосылки для его повторной отработки. Данная технология позволит повысить степень извлечения калийной руды за счет освоения запасов, ранее относившихся к проектным потерям [2]. В связи с этим в период с 2022 по 2024 гг. на экспериментальном участке ВКМКС реализован первый этап опытно-промышленных испытаний (ОПИ) технологии повторной отработки. Основная цель данного этапа состояла в оценке технической возможности и безопасности проходки выработок в массиве природно-техногенного пласта КрII*, а также в уточнении горно-геологических и горнотехнических условий проходки.

Первичная отработка двух пологопадающих сближенных сильвинитовых пластов на участке ОПИ производилась в первой половине 1970-х гг. комбайнами Караганда-7/15 по пласту КрII и ПК-8 по пласту АБ. Параметры первичной отработки представлены на рис. 1, а. В отличие от условий пласта АБ, междукammerные целики пласта КрII имели существенно большую степень нагружения, а их деформирование происходило в податливом режиме. Это привело к погашению очистных камер пласта КрII обломками краевых частей целиков, которые впоследствии сконсолидировались под действием влаги

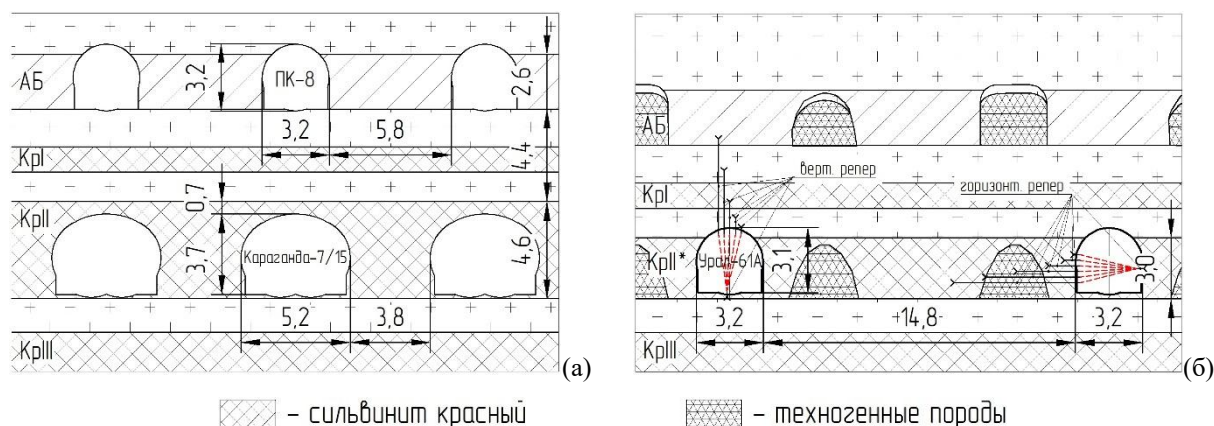


Рис. 1. – Технологические схемы первичной отработки пластов КрII и АБ (а) и повторной отработки природно-техногенного пласта КрII* (б) на участке ОПИ

и горного давления в сплошной техногенный массив. В результате сформировался непрерывный природно-техногенный пласт КрII* постоянной мощности (около 3 м), пригодный к повторной отработке. Как показали геомеханические расчеты [1] в данных условиях оптимальной технологической схемой повторного извлечения запасов, оставленных в целиках пласта КрII* на участке ОПИ, является проходка одноходовых камер комбайном Урал-61А с двукратным межосевым расстоянием по сравнению с первичной отработкой. В рамках выполнения ОПИ предусмотрена проходка 10-ти исследовательских камер по природно-техногенному пласту КрII* с параметрами, указанными на рис. 1, б.

С целью контроля геомеханических процессов, происходящих в массиве природно-техногенного пласта КрII* при повторной отработке его запасов, программой ОПИ был предусмотрен комплекс научно-исследовательских работ, включающий:

- исследования физико-механических свойств пород природно-техногенного пласта КрII* и вмещающих пород;
- проведение натурных (полевых) измерений деформаций несущих элементов камерной системы повторной разработки;
- оценка устойчивости пройденных исследовательских выработок;
- определение газоносности массива природно-техногенного пласта КрII*.

Для оценки состояния исследовательских выработок на участке ОПИ были оборудованы подземные станции наблюдения (НС) за смещением приконтурного массива. Конструкция долговременной станции представляет собой систему глубинных и контурных реперов, расположенных в плоскости сечения выработки (рис. 1, б). Оценка смещений породного массива осуществлялась за счет периодического измерения ленточным экстензометром расстояний между реперами, установленными во взаимопротивоположных конструктивных элементах выработки (кровля-почва, левый бок-правый бок) [3].

По результатам мониторинга состояния выработок, пройденных в природно-техногенном пласте КрII*, установлено отсутствие anomalно высоких величин смещения их контура. Максимальные скорости смещения не превышают 40 мм/год, в зависимости от горно-геологических условий размещения наблюдательной станции. Состояние приконтурного массива характеризуется удовлетворительной устойчивостью и соответствует общей практике поддержания горных выработок на Верхнекамском месторождении.

Таким образом, предварительные результаты опытно-промышленных испытаний технологии повторной отработки подтвердили техническую возможность и безопасность выполнения горных работ, а также позволили уточнить горно-геологические и горнотехнические условия проходки выработок в природно-техногенном массиве пласта КрII*.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.7.1.

Литература

1. Барях А.А., Бельтюков Н.Л., Самоделкина Н.А., Токсаров В.Н. Обоснование возможности повторной отработки запасов калийных руд // ФТПРПИ. 2020. № 3. С. 85-97. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200309>
2. Galvin J.M. Ground engineering – principles and practices for underground coal mining. Springer Int. Publish., 2016. 684 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25005-2>
3. Евсеев А.В. Методика инструментального контроля процессов деформирования камерного блока при двухпластовой отработке сильвинитовых пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. Вып. 13. С. 105-107.

МОДЕЛЬ УПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ

Барях А.А., Цаюков А.А., Самоделкина Н.А., Девятков С.Ю.

«Горный Институт УрО РАН» - филиал ФИЦ УрО РАН

При разработке калийных и соляных месторождений главной задачей на рудниках является сохранение водозащитной толщи (ВЗТ) на протяжении всего срока эксплуатации рудника. В связи с чем, как правило, используется камерная система отработки, где основные функции по обеспечению сохранности ВЗТ выполняют несущие конструкции – междуканальные целики (МКЦ).

Исследование процессов деформирования соляных образцов при одноосном сжатии [1] и проявляющихся в них временных эффектов [2] с помощью многовариантного математического моделирования позволило заключить, что выделенные критерии — критерий Кулона-Мора [3] и объёмный параболический критерий прочности горных пород [4], — совмещённые с вязкопластическим законом Перича [5], характеризуются относительно простым, стабильным параметрическим обеспечением и приемлемо описывают стадию установившейся ползучести. Это выглядит простым с точки зрения калибровки математической модели.

Цель текущих исследований — увеличение масштаба (переход к натурным наблюдениям) исследуемых процессов деформирования, протекающих в соляных породах, и попытка применить построенную упруго-вязкопластическую модель [2] для описания полученных результатов.

Исследования базировались на натурных наблюдениях за деформированием канальных сегментов [6], выполненных с помощью комплексных замерных станций на рудниках ПАО «Уралкалий». В качестве объекта натурных исследований рассматривалась стандартная для рудников Верхнекамского месторождения двухпластовая отработка сильвинитовых пластов АБ и Красный-II (КрII). Основными измеряемыми параметрами являются горизонтальная конвергенция очистных камер и вертикальная деформация целиков и кровли камер. Результаты наблюдений были приняты для калибровки математической модели.

Моделировался двухпластовый канальный сегмент, отражающий отработку комбайнами Урал-20Р, где параметры отработки соответствовали одному из экспериментальных участков. Расчёты выполнялись в двухмерной постановке в условиях плоской деформации (ПДС) [7]. Слоистое строение породного массива не учитывалось. Весь массив находится под действием сил гравитации. Расчётная схема соответствовала условиям полной подработки.

Поскольку экспериментальные значения деформации камеры пласта АБ довольно малы и ими можно пренебречь, калибровка модели производилась по результатам наблюдений в камере пласта КрII. В связи с чем варьирование параметров пластичности (А) и вязкости (Р) выполнялось в пределах выделенных зон: пласт КрII, нижележащая толща и вышележащая толща.

В качестве критерия пластичности использовался объёмный параболический критерий с ассоциированным течением неупругой деформации, а также связанный с ним закон вязкопластичности Перича.

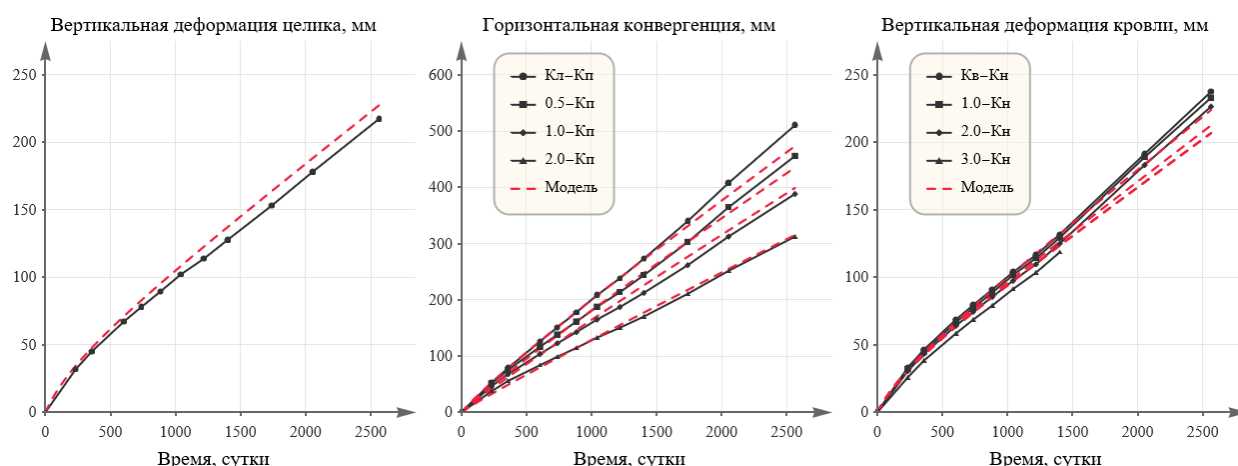


Рис. 1. – Результаты моделирования процесса деформирования камерного сегмента во времени в камере пласте КрП. Обозначения: Кл – контурный левый репер; Кп – контурный правый репер; Кв – контурный верхний репер; Кн – контурный нижний репер; 0.5-3.0 – глубинные реперы (метры), расположенные на левой стороне очистной камеры.

Результаты многовариантного моделирования показали, что модельные диаграммы деформирования камерного сегмента качественно и количественно соответствуют наблюдаемым в натурных условиях (рис. 1). Однако, для обеспечения требуемых скоростей деформации в модели необходимо существенно уменьшить предел прочности на сжатие ($\sigma_c = 3 \text{ МПа}$) целиков и вмещающих пород, что не соответствует их фактической несущей способности.

Таким образом, разработанная и верифицированная по результатам натурных исследований упруго-вязкопластическая модель позволяет адекватно описать процессы деформирования соляных междукammerных целиков во времени.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.7.2.

Литература

1. Baryakh, A., Tsayukov, A. Justification of fracture criteria for salt rocks // Fracture and Structural Integrity. 2022. Vol. 16, №62. pp. 585–601. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.62.40>
2. Baryakh A., Tsayukov A. Elastic-viscoplastic deformation models of salt rocks // Fracture and Structural Integrity. 2024. Vol. 18, №70. pp. 191–209. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.70.11>
3. Labuz, J.F., Zang, A. Mohr–Coulomb Failure Criterion // Rock Mech Rock Eng. 2012. Vol. 45. pp. 975–979. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>
4. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Об одном критерии прочности горных пород // Чебышевский сборник. 2017. Т. 18, №3. С. 72-87. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2017-18-3-72-87>
5. de Souza Neto, E.A., Perić, D. and Owen, D.R.J. Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2008. 791 p. <https://doi.org/10.1002/9780470694626>
6. Evseev A., Asanov V., Lomakin I., Tsayukov A. Experimental and theoretical studies of undermined strata deformation during room and pillar mining // EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses, Saint Petersburg, Russia, May 2018. Vol. 2-2. — pp. 985-990.
7. Corradi L., Gioda G. A Plane-Strain Formulation of Elastic-Plastic Constitutive Laws // Journal of Structural Mechanics: An International Journal, 1979. Vol. 7, №3. pp. 325-364. <https://doi.org/10.1080/03601217908905324>

ИНЖЕНЕРНЫЕ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ СТРУКТУРНО- НЕОДНОРОДНЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Евсеев А.В., Ломакин И.С., Федосеев А.К.

«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Безопасная эксплуатация месторождений водорастворимых руд определяется непроницаемостью водозащитной потолочины, отделяющей продуктивную залежь от водонасыщенных пород. На Верхнекамском месторождении солей это достигается применением камерной системы разработки, которая обеспечивает плавный и равномерный характер оседания подработанного массива.

В настоящее время на всех рудниках месторождения для контроля процессов деформирования междукамерных целиков и своевременного применения необходимых мер охраны ведется геомеханический мониторинг, включающий маркшейдерские наблюдения за оседанием земной поверхности и инструментальные измерения горизонтальной конвергенции очистных камер. Для детального изучения процесса деформирования элементов системы разработки в различных горно-геологических и горнотехнических условиях сооружаются наблюдательные станции с глубинными и контурными реперами. Анализ результатов измерений показал, что между продольной и поперечной деформацией наблюдается практически линейная взаимосвязь, при этом отношение поперечных деформаций к продольным составляет около 1,6. Полученная зависимость играет крайне важное значение и позволяет оценивать оседание на участках, в пределах которых отсутствуют профильные линии на земной поверхности.

Неотъемлемой частью методики контроля горизонтальной конвергенции очистных камер является обоснование критериев устойчивости несущих элементов системы разработки. По результатам натурных измерений деформаций целиков установлено, что достижение скорости горизонтальной конвергенции очистных камер величины 30 мм/м в год свидетельствует о начале их интенсивного деформирования. Теоретическая оценка предельных состояний междукамерных целиков для различной начальной степени их нагружения выполнена методами многовариантного математического моделирования. Анализ результатов показывает, что достижение относительной скорости поперечного деформирования целиков 50–100 мм/м отражают их критическое состояние и потерю несущей способности.

Следует отметить, что при приближении скорости поперечных деформаций целиков к критическим значениям доступ в очистные камеры чаще всего ограничен и дальнейшее продолжение инструментальных наблюдений становится невозможным. В этом случае представляется целесообразным использовать прогнозные оценки деформаций целиков, базирующиеся на упруго-вязкопластической модели.

Инструментальные измерения на подземных наблюдательных замерных станциях позволяют разделить вклад каждого отрабатываемого пласта в суммарную величину оседаний и выполнять прогноз развития процесса сдвижения с учётом скоростей деформирования целиков на каждом пласте. Вместе с тем, шахтные измерения [1] показали, что основной вклад в величину оседания земной поверхности вносят как правило деформации целиков пласта КрII ввиду их большей степени нагружения. Результаты многовариантного численного моделирования потери несущей способности междукамерных целиков пласта КрII во времени в процессе ползучести для трех

рассмотренных участков представлены на рис. 1 в виде прогнозных диаграмм развития скоростей относительных поперечных деформаций.

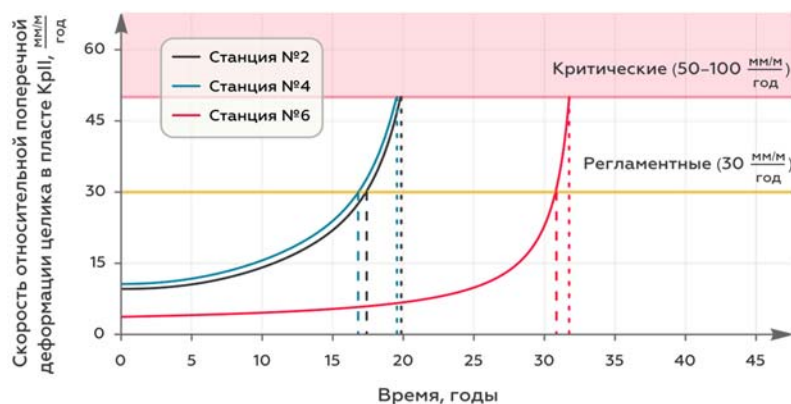


Рис. Прогнозное развитие скоростей относительных поперечных деформаций междукammerных целиков пласта КрII во времени и оценка остаточного срока их службы

Полученные модельные графики скоростей можно использовать для прогнозных оценок остаточного срока службы междукammerных целиков и регламентированного периода производства необходимых закладочных работ. В частности, период, в течение которого необходимо выполнить закладку очистных камер пласта КрII, определяется точкой пересечения диаграмм скоростей с отметкой (30 мм/м в год). В этом случае для участков № 2 и № 4 время внесения закладки оценивается ближайшими 7–8 годами, а для участка № 6 – примерно 20 годами. Следует отметить, что похожие результаты для целиков с начальной степенью нагружения $S_0=0.4$ были получены в работе [2], где моделировалось изменение степени нагружения целиков во времени.

Таким образом, выполненное математическое моделирование процесса разрушения междукammerного целика во времени с помощью построенной упруго-вязкопластической модели деформирования камерного блока показали принципиальную возможность прогнозирования состояния междукammerных целиков и остаточного срока их службы. Предложенный подход может использоваться для корректировки срока выполнения закладки выработанного пространства.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.7.3.

Литература

1. Барях А.А., Евсеев А.В., Глебова П.А., Васильева Е.Л. Прогноз оседаний земной поверхности по данным измерения деформаций горных выработок // Горный журнал. 2023. № 11. С. 10 – 14.
2. Барях А.А., Лобанов С.Ю., Ломакин И.С. Анализ изменения степени нагружения междукammerных целиков во времени на верхнекамском месторождении солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 4. С. 70 – 82.

СОРБЦИЯ ГАЗА ВОДОРАСТВОРИМЫМИ АЭРОЗОЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Кузнецова Ю.Л.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Разработка калийных месторождений в большинстве случаев сопровождается выделением в рудничную атмосферу вредных газов, таких как углекислый газ (CO_2) и метан (CH_4). Экспериментальные исследования концентрации вредных газовых примесей по длине выработки показали, что наблюдается снижение содержания данных компонентов в воздухе от забоя, источника их появления, до устья камеры [1]. Предполагается, что снижение концентрации связано со способностью природных калийных солей поглощать газообразные примеси [2].

В отличие от большинства широко используемых сорбентов, породы калийных месторождений являются плотными, обладают незначительной пористостью и трещиноватостью [1]. Также они являются химически нейтральными по отношению к рассматриваемым газам. В связи с чем, к данным веществам не могут быть применены хорошо разработанные подходы оценки абсорбции для сорбентов, обладающих такими свойствами.

Ключевым свойством солей является гигроскопичность – способность адсорбировать влагу из воздуха и растворяться при превышении критической влажности (DRH). Образуемая при добыче мелкодисперсная пыль, покрытая водной плёнкой или раствором, создаёт большую поверхность для сорбции газов, что может служить причиной наблюдаемого очищения рудничной атмосферы по длине выработки.

Для изучения данного эффекта на основе модели [3] разработана новая модель для описания поглощения газовой примеси одиночной водорастворимой частицей, см. рис. 1а. В модели учитывается влияние на интенсивность поглощения газа изменений: концентрации раствора соли за счет растворения кристаллического ядра, концентрации раствора угольной кислоты за счет растворения углекислого газа, эволюция температуры и размера частицы. В модели учтено влияние ионизации молекул газа и поверхности частиц за счет формирования тонкой водной пленки, а также протекания кислотно-основной реакции на интенсификацию силового взаимодействия между молекулами газа и запуск химических реакций [4]. Для этого в диффузионное уравнение для изменения количества абсорбированного газа и в коэффициенты скорости химической реакции вводится дополнительное фиктивное слагаемое [5].

Система уравнений разработанной модели решалась численно, методом последовательного интегрирования с использованием явной схемы для производной по времени. С помощью разработанной модели построены зависимости содержания молекул воды, газовой примеси и растворенной соли в частице от времени. Проведено исследование влияния значений параметров процесса, таких как: начальный размер и степень растворенности частицы, а также влажность (см. рис. 1б), концентрация газовой примеси и температура окружающего воздуха. Установлено, что учет явления ионизации молекул газа и поверхности частицы приводит к незначительному увеличению скорости поглощения диоксида углерода. Однако количественный анализ показал, что относительное изменение всех рассматриваемых показателей эффективности (скорости абсорбции, общей поглощенной массы и времени достижения насыщения) не превышает 1%. Это позволяет сделать вывод о том, что вклад электростатических эффектов в общий механизм массопереноса в изученном диапазоне условий является статистически незначимым, хотя и наблюдаемым.

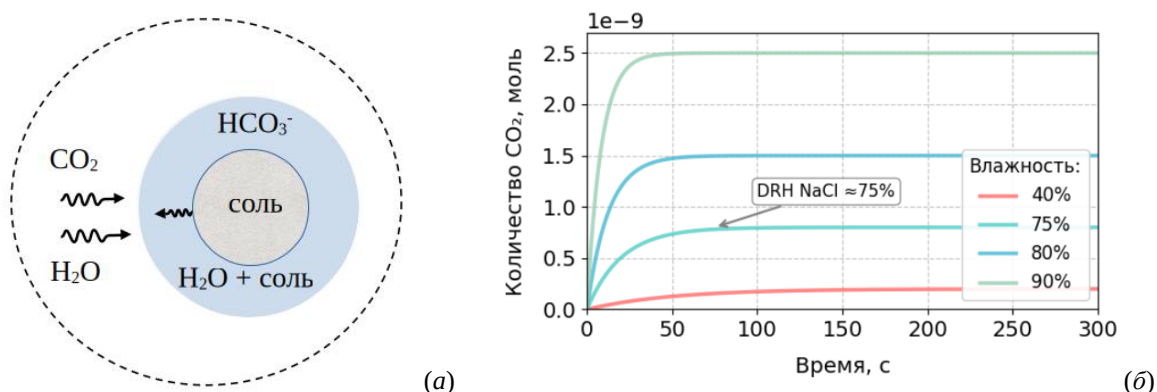


Рис. 1. - Схема растворения аэрозольной частицы, сопровождаемая сорбцией газа из воздуха (а); влияние влажности окружающего воздуха на интенсивность поглощения углекислого газа каплей раствора хлорида натрия с $r_0 = 10$ мкм (б).

Разработанная модель была применена для оценки суммарной сорбционной ёмкости аэрозольных частиц, находящихся в единице объёма (1 м^3) как монодисперсной, так и полидисперсной системы. Моделирование выполнялось в условиях постоянной концентрации целевой газовой примеси в воздушной среде. Сравнительный анализ продемонстрировал, что результаты численного моделирования предсказывают существенно заниженные значения количества сорбированного газа по сравнению с экспериментальными данными, полученными в ходе натурных наблюдений и лабораторных исследований сорбционной способности массивов калийных солей [6]. Выявленное систематическое расхождение между модельными и экспериментальными данными указывает на наличие дополнительных физико-химических механизмов сорбции в реальных условиях, не учтённых в текущей версии модели, что определяет направления для её дальнейшего совершенствования.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.10.1.

Литература

1. Медведев И.И., Полянина Г.Д. Газовыделения на калийных рудниках. М. : «Недра», 1974. 168 с.
2. Суханов А.Е., Бруев Н.А., Газизуллин Р.Р., Стариков А.Н. Исследование сорбционных свойств солей на примере газов, содержащихся в атмосфере калийных рудников // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. Вып. 1. С. 495-507.
3. Кузнецова Ю.Л. Эволюция размера растворимой аэрозольной частицы во влажном воздухе // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. Т.15, № 1. С. 31–44
4. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. О влиянии атмосферных ионов на образование аэрозоля в тропосфере: численное моделирование // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59, №4. С. 467-473. doi: [10.31857/S000235152304003X](https://doi.org/10.31857/S000235152304003X)
5. Wang A., Oudin-Dubois A., Najamezhadmashhadi A., Inge C., Häggmark C., Duwig C. Numerical Simulation of CO_2 Absorption by a Single Droplet with Amine-Based Solvent // Proceedings of the 16th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-16). 23-24 Oct 2022. [http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4275608](https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4275608)
6. Суханов А.Е., Бруев Н.А., Газизуллин Р.Р., Стариков А.Н. Исследование сорбционных свойств солей на примере газов, содержащихся в атмосфере калийных рудников // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. Вып.1. С. 495-507

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ПАРОВ КРЕМНИЯ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО ВАКУУМА С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПАКЕТА CRYSTARPACK

^aДемин В.А., ^{a,b}Демина Т.В., ^bКоновалов В.В., ^{a,b}Любимова Т.П.

^aПермский государственный национальный исследовательский университет

^b«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Цель работы: Трехмерное численное моделирование высокотемпературного процесса переноса паров кремния в разреженной атмосфере аргона для технологии парофазного силицирования углеродных материалов в рамках цилиндрической геометрии.

Актуальность: Парофазное силицирование используется для создания композиционных материалов на основе углеродного волокна, насыщенного кремнием, которые обладают высокими антиокислительными, прочностными и герметизирующими свойствами. Однако для крупногабаритных изделий сложно достичь равномерности пропитки, что приводит к дефектам. Предварительное численное моделирование позволяет прогнозировать и оптимизировать этот процесс.

Проблема предыдущих моделей: Классические модели, основанные только на уравнении диффузии [1], приводили к парадоксальным результатам. Так, они предсказывали необходимость максимального приближения источника паров (тигля) к изделию и давали крайне малые значения потоков кремния, не согласующиеся с экспериментальными данными.

Физико-математическая модель

В работе используется модифицированное уравнение нелинейной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D_c (\nabla C)^2 = D \Delta C,$$

где C – массовая доляная концентрация газообразного кремния, D – коэффициент диффузии, D_c – параметр конвективного переноса, имеющий ту же размерность, что и D .

Нелинейное слагаемое $D_c (\nabla C)^2$ учитывает дополнительный конвективный массоперенос, обусловленный фильтрацией паров кремния через неподвижную атмосферу аргона. Этот механизм описывается законом Дарси, и его вклад может превалировать над чистой диффузией.

Моделирование проводится для среднего вакуума (~100 Па) и высоких температур (1800–1900 К). Давление паров кремния (~10 Па) значительно меньше давления аргона.

Трехмерная постановка задачи и методика расчета

Моделируется система в реалистичной геометрии, а именно для цилиндрической реторты с полым цилиндрическим изделием в центре и несколькими тиглями конечных размеров порядка 14 см×23 см, расположенных на дне. Учитывается симметрия, а поэтому расчеты проводятся для сегмента (угол 90°) с периодическими граничными условиями, как показано на рисунке 1. Конфигурация включает два тигля в таком сегменте.

Граничные условия:

- На зеркале расплава постоянная концентрация $C = C_m$.
- На поверхности изделия $C = 0$ (полное поглощение).
- На стенках реторты задано условие непроницаемости.

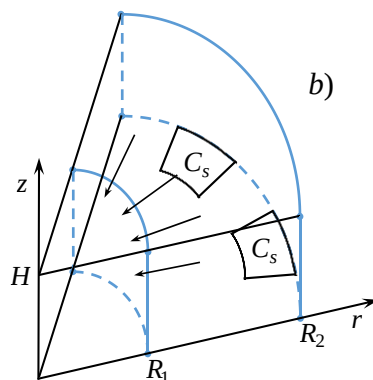


Рис. 1. - Схематическое изображение системы в трехмерной постановке. Стрелками изображен сходящийся поток паров кремния

Ранее проблема уже исследовалась для конфигурации с одним тиглем для реторты, имеющей форму параллелепипеда [3], а также для цилиндрической реторты, но только в осесимметричной постановке [4]. Сейчас более сложная геометрия вычислительного домена делает оправданным использование в расчетах авторского высокоуровневого вычислительного пакета CrystarPack [4,5], который реализует в настоящем случае метод конечных разностей. Применялась неявная схема второго порядка точности, как по времени, так и по пространству. Размерность расчетной сетки варьировалась от $50 \times 50 \times 25$ до $100 \times 100 \times 50$ узлов. Прочие параметры численного решения: радиусы домена $R_1 = 20$ см и $R_2 = 90$ см, высота реторты $H = 40$ см, а также $D = 0,7 \text{ м}^2/\text{с}$, $D_c = 58 \text{ м}^2/\text{с}$ и $C_m = 0,08$.

Результаты трехмерного моделирования и их обсуждение

В начальный момент времени над тиглями формируется четкий концентрационный фронт, который быстро (уже при $0,01$ с) размывается, и в системе устанавливается сходящийся к оси симметрии поток, обладающий практически идеальной цилиндрической симметрией, несмотря на дискретное расположение источников.

Время установления стационарного решения оказывается порядка 1 с. На рисунке 2 показаны стационарные распределения концентрации кремния C на двух разных высотах ($h = 1$ см и $h = 20$ см).

Основной практический результат – значения градиента концентрации (производной) на поверхности изделия. Представленные на рисунке 3 данные расчетов подтверждают, что модифицированная модель с конвективным переносом дает значения производной на порядок выше, чем модель чистой диффузии, что объясняет наблюдаемую на практике эффективность процесса парофазного силицирования без необходимости чрезмерного приближения тиглей к изделию.

Можно сделать вывод, что предложенная модель с модифицированным уравнением нелинейной диффузии успешно разрешает парадоксы предыдущих диффузионных моделей, давая количественное согласие с экспериментом по величине потока кремния в изделие. И все это без привлечения более сложных моделей газовой динамики.

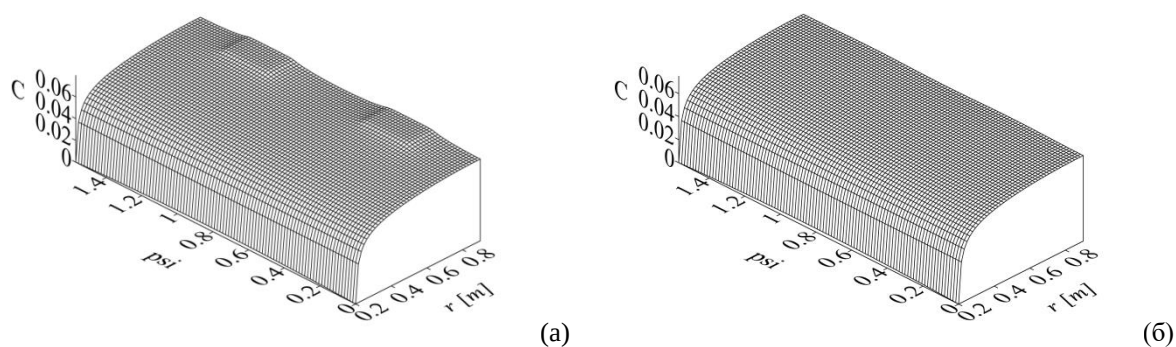


Рис. 2. - Стационарные распределения концентрации кремния на высотах 1 см (а) и 20 см (б) в зависимости от радиальной и азимутальной координат

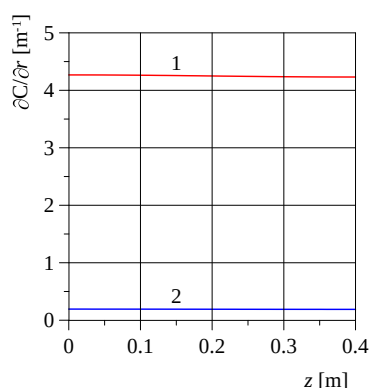


Рис. 3. – Профиль градиента концентрации кремния на поверхности изделия в зависимости от вертикальной координаты. Кривая 1 – модифицированная модель с конвективным переносом. Кривая 2 – модель чистой диффузии

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.10.2.

Литература

- Кулик В.И., Кулик А.В., Рамм М.С., Демин С.Е. Численное исследование градиентных газофазных процессов получения керамоматричных композитов с SiC матрицей // V Межд. конф. “Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества”. Сб. матер. конф., М.: ИМЕТ РАН, Суздаль. 2014. С. 128-129.
- Демин В.А., Демина Т.В. Трехмерное численное моделирование процесса переноса паров кремния в ходе насыщения пористой углеродной матрицы // Теплофизика высоких температур. 2024. Т. 62, № 6. С. 874-883. <https://doi.org/10.31857/S0040364424060102>
- 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. 2024. Vol. 19 (3). P. 103-111. <https://doi.org/10.21662/mfs2024.3x021>
- Коновалов В.В., Любимова Т.П. Разработка библиотеки встраиваемого программного кода для решения задач направленной кристаллизации // Вычислительная механика сплошных сред. 2008. Т. 1, № 4. С. 43-54.
- Konovalov V.V. Development of CrystarPack numerical package for solving computational fluid dynamics problems // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2022. Vol. 2317. P. 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2317/1/012003>

НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ПРОВЕТРИВАНИЯ РАБОЧИХ ЗОН КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Левин Л.Ю., Мальцев С.В., Семин М.А., Суханов А.Е.

«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Эффективность и безопасность разработки глубоких калийных месторождений в значительной части определяются состоянием системы вентиляции тупиковых горных выработок. К основным параметрам, которыми можно охарактеризовать благоприятность рудничной атмосферы в призабойном пространстве, стоит отнести количество требуемого воздуха, температуру, влажность и количество вредных, а также ядовитых газов. Любое отклонение среди приведенных параметров влечет за собой нарушение требований ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ...» и увеличивает риск возникновения аварийной ситуации или несчастного случая среди горнорабочих. В связи с этим актуальными задачами являются изучение параметров, формирующих рудничный микроклимат в призабойном пространстве, и разработка мероприятий по их нормализации, при необходимости.

Калийные месторождения в Российской Федерации разрабатываются высокопроизводительными проходческо-очистными комплексами. В состав таких комплексов входят добычной комбайн, бункер перегружатель и самоходный вагон. Проветривание тупиковых выработок осуществляется вентиляторами местного проветривания. Традиционно используются нагнетательная схема проветривания. Такое количество мощного электрического оборудования, используемого при разработке глубоких месторождений, влечет за собой рост температуры в горных выработках [1]. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненными в рамках данного проекта. Измеренная динамика температуры при работе добычного оборудования при разных способах проветривания горных выработок представлена на рисунке 1.

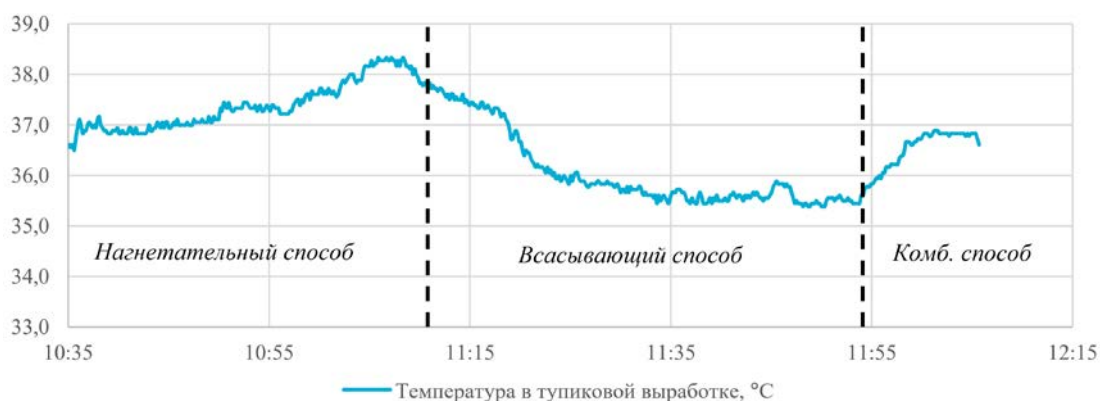


Рис. 1. Графики изменения показаний температуры в тупиковой выработке при разных способах проветривания

Разрушение массива планетарно-дисковыми или роторными исполнительными органами добычных комбайнов, а также дальнейшие этапы перегрузки в границах тупиковой выработки характеризуются высокой степенью пылевыведения. В результате чего горнорабочие подвергаются высокому риску профессиональных заболеваний, а также снижается видимость при осуществлении технологических операций. Исследования пылевой обстановки при разных способах проветривания приведены на рисунке 2.

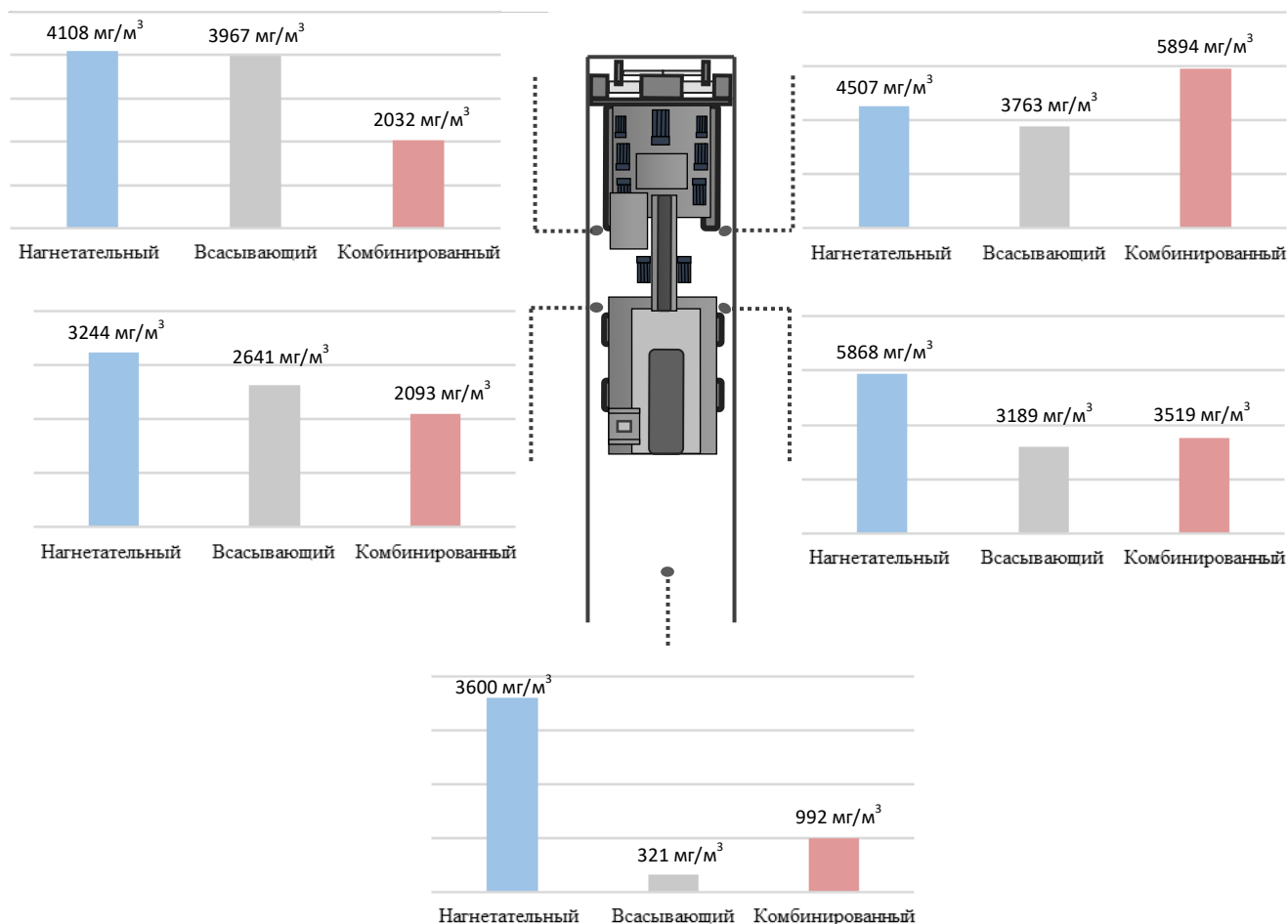


Рис. 2. Сравнительные диаграммы усредненных значений концентрации пыли по высоте отбора пробы в тупиковой выработке

Выполненные ранее исследования показывают перспективность использования всасывающего способа проветривания при разработке калийных месторождения в условиях высоких температур и сложной пылевой обстановки. В то же время исследование [2] показывает, что разработка калийных месторождений в большинстве случаев осложняется присутствием горючих газов в горной породе. В связи с чем существующие требования ФНиП запрещают использования предлагаемого способа проветривания. Разработка обоснования безопасности опасного производственного объекта в части изменения способа проветривания позволит узаконить предлагаемые решения. Для этого в рамках исследования выполнено изучение газовой обстановки в рабочей зоне калийных рудников.

При выполнении качественного и количественного анализа рудничного воздуха в тупиковых калийных выработках выполнены замеры экспресс-методом и лабораторным

методом. Определение количественного анализа рудничного воздуха на содержание оксида углерода, диоксида углерода, метана, водорода и кислорода проводится на газовом хроматографе «Хромос ГХ 1000». Измерения проводятся в соответствии с ГОСТ Р 8.563–2009, с учетом требований ГОСТ Р ИСО 5725–2002, ГОСТ 12.1.016-79. Анализ результатов лабораторных исследований показал, что в исследуемых забоях концентрация взрывоопасных газов не превышает предельно-допустимой концентрации, которая равна 0,5 %.

Полученные результаты позволяют определить реальные характеристики воздушной среды, включающие распределение температур, газовых примесей и скоростей движения воздуха. На их основе сформирован комплекс исходных данных для настройки CFD моделей турбулентного течения потоков воздуха в условиях подземных рудников. Собранный массив исходных данных использован для выполнения расчетов распределения полей температур [3,4], полей газовых примесей [5], а также пространственных распределений концентрации пылевого аэрозоля в тупиковых комбайновых горных выработках [6].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.10.3.

Литература

1. Zaitsev A., Parshakov O., Semin M. Heat emissions from mining machinery: implications for microclimatic conditions in underground workings // Mining. – 2024. – Т. 4. – №. 4. – С. 1075-1092.
2. Андрейко С. С., Лядов В. О., Папулов А. С., Абашин В. И. Анализ геологических условий проявления газодинамических явлений в условиях Гремячинского гока // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 465-474. – EDN URYHEU.
3. 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. – С. 126183.
4. Levin, L.; Semin, M.; Maltsev, S.; Luzin, R.; Sukhanov, A. Numerical Analysis of the Impact of Variable Borer Miner Operating Modes on the Microclimate in Potash Mine Working Areas // Computation. – 2025. – V. 13, no. 85. <https://doi.org/10.3390/computation13040085>.
5. Левин Л. Ю., Суханов А. Е., Мальцев С. В. Определение безопасных параметров системы вентиляции тупиковых калийных выработок при всасывающем способе проветривания по фактору взрывоопасных газов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9. – С. 117–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_117.
6. Исаевич А.Г., Суханов А.Е., Желнин М.С., Поляков И.В. Оценка эффективности различных вариантов проветривания тупикового комбайнового забоя по пылевому фактору в условиях глубокого калийного рудника // Горный журнал. – 2023. – № 11. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.07.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ТУПИКОВОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

Таций А. В., Трушкова Н. А., Мальцев С. В., Левин Л. Ю.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Эффективное проветривание тупиковых горных выработок является одной из ключевых задач рудничной вентиляции. В призабойной зоне таких выработок формируется сложная структура воздушных потоков с крупномасштабным вихревым движением, влияющим на процессы массопереноса и разбавление вредных примесей. Из-за сложности натурных экспериментов, требующих высокой точности измерений, в последние десятилетия широко применяются методы вычислительной гидродинамики (CFD), позволяющие моделировать трёхмерную структуру воздушных потоков [1].

Корректность численного моделирования в значительной степени определяется качеством параметризации математической модели воздухораспределения, включающей выбор геометрии выработки, граничных условий, характеристик вентиляционной струи и параметров турбулентности. От адекватности этих параметров зависит соответствие расчётных результатов реальным процессам, что делает задачу параметризации ключевым этапом при исследовании проветривания тупиковых горных выработок.

В большей степени достоверность таких расчётов определяется выбором модели турбулентности. На практике чаще всего используют двухпараметрические модели $k-\epsilon$ [2] и $k-\omega$ [3], обеспечивающие оптимальное соотношение между точностью и вычислительными затратами. Модели *realizable* $k-\epsilon$ и SST $k-\omega$ хорошо описывают отрывные и вторичные течения [4], однако при сильной рециркуляции их точность может быть ограничена.

В качестве альтернативы применяются как более простые модели (например, Spalart–Allmaras), так и более сложные гибридные подходы, сочетающие методы RANS и LES (например, модель SST $k-\omega$ SBES). Последние способны точнее воспроизводить нестационарную эволюцию крупномасштабных вихрей, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и высокой качества расчётной сетки. Анализ литературы показывает, что в рудничной вентиляции применяются различные модели турбулентности, при этом чёткая аргументация выбора той или иной модели с точки зрения физики течения обычно отсутствует. Между тем, для некоторых типов течений разные модели турбулентности (даже в рамках класса RANS) могут давать существенно различные результаты. Поэтому выбор адекватной модели турбулентности при численном моделировании проветривания тупиковых выработок остаётся открытым вопросом. Сравнительный анализ различных моделей в идентичных условиях позволяет выявить степень их соответствия друг другу и реальным процессам.

Для исследования влияния моделей турбулентности *realizable* $k-\epsilon$, $k-\omega$ SST, Spalart–Allmaras и $k-\omega$ SST-SBES на характер проветривания тупиковой выработки проводилось сравнение картин течения продольного и поперечного воздушного потока. Анализировались величина спутного потока и относительная максимальная скорость в поперечных сечениях горной выработки. Сопоставление моделей выполнялось при одинаковой геометрии и граничных условиях. Результаты моделирования сравнивались не

только между различными моделями турбулентности, но и с данными натурных измерений [5].

Совокупность полученных характеристик позволяет оценить не только степень проветривания призабойного пространства, но и интенсивность перемешивания свежего воздуха с загрязнённой атмосферой, а также степень вовлечения воздуха в крупномасштабный вихрь, возникающий в результате удара струи о забой выработки.

На рисунке 1 приведены поля продольной составляющей скорости воздушного потока (V_x) в тупиковой выработке при использовании различных моделей турбулентности. На рисунке 2 приведены поля поперечной составляющей ($\sqrt{V_y^2 + V_z^2}$) скорости воздушного потока при том же отставании.

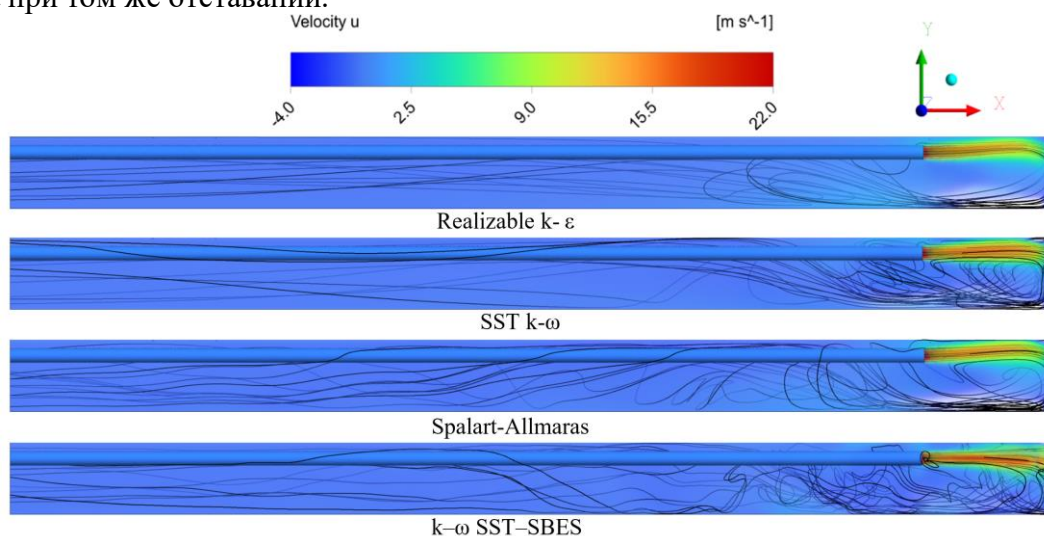


Рис. 1. Поля продольной (V_x) скорости воздушного потока в тупиковой выработке при разных моделях турбулентности при отставании трубопровода 10 метров

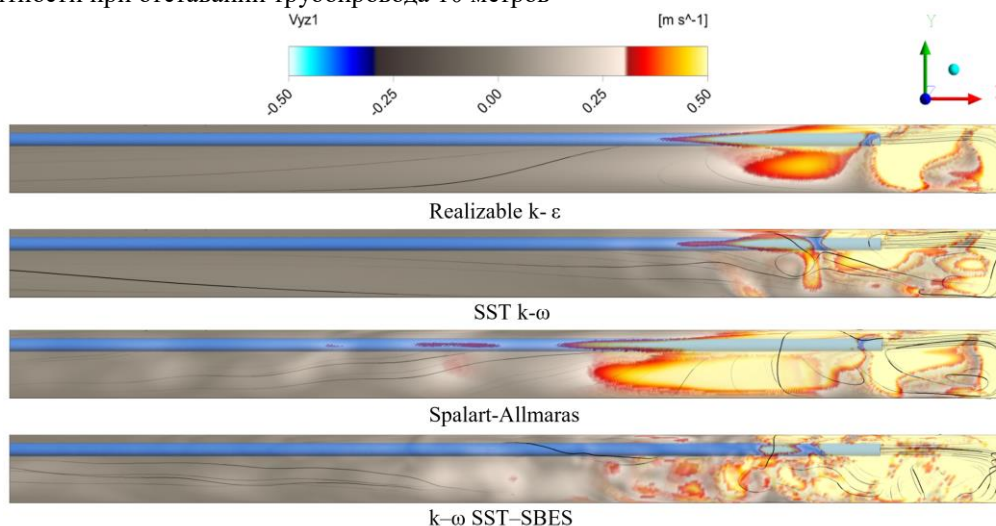


Рис. 2. Поля поперечной ($\sqrt{V_y^2 + V_z^2}$) скорости воздушного потока в тупиковой выработке при разных моделях турбулентности при отставании трубопровода 10 метров

Для количественной оценки приведённых величин, а также для анализа структуры воздушных потоков на рисунке 3 представлены графики зависимости исследуемых параметров при отставании вентиляционного трубопровода на 10 м при использовании различных моделей турбулентности. Результаты, показанные на графиках, получены в ходе вычисления соответствующих параметров в поперечных сечениях, расположенных через один метр вдоль всей выработки.

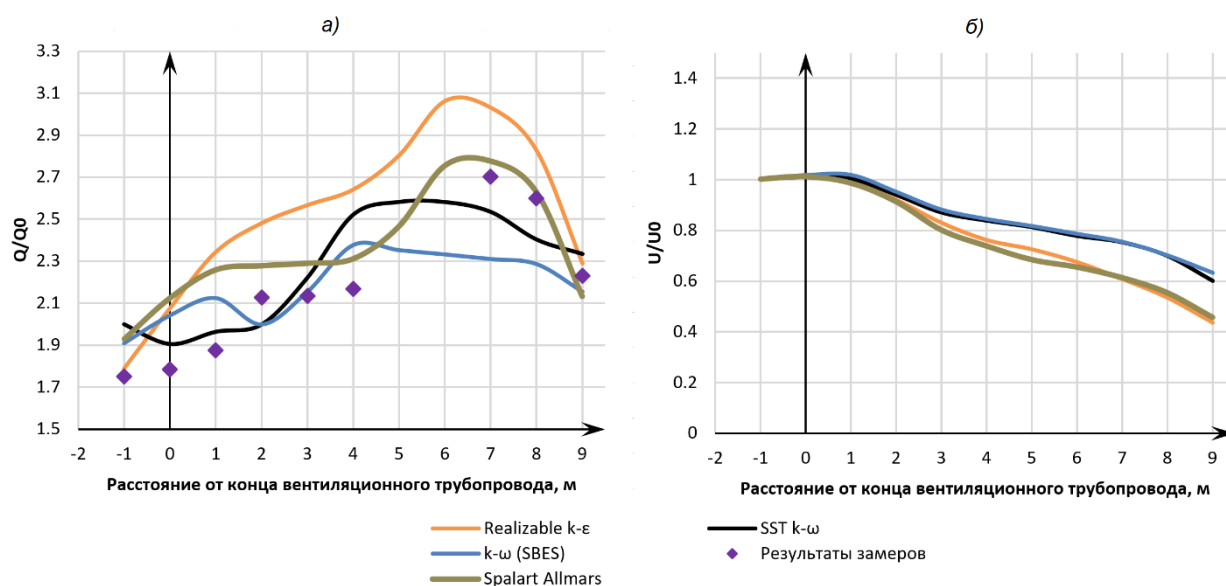


Рис. 3. Величины спутного потока (а) и безразмерной максимальной скорости (б) воздуха в различных поперечных сечениях при разных моделях турбулентности и отставании конца трубопровода 10 метров

Проведённое численное исследование подтвердило, что выбор модели турбулентности оказывает значительное влияние на воспроизведение аэродинамических характеристик вентиляции тупиковых горных выработок. Сравнение моделей Realizable k- ϵ , k- ω SST, Spalart-Allmaras и k- ω SST-SBES позволило выявить различия в структуре воздушных потоков, характеризующих эффективность проветривания.

Результаты показали, что при отставании трубопровода 10 метров наиболее близко к результатам эксперимента находятся кривые моделей турбулентности SST k- ω и k- ω (SBES). Сопоставимый характер зависимости наблюдается и для модели турбулентности RKE, которая несколько завышает (на 10-15 %) значения в сравнении с экспериментом. Вместе с этим модель RKE (наряду с моделью Spalart-Allmaras) дает наиболее пессимистичную оценку по максимальной скорости воздушного потока, которая в этих моделях убывает быстрее при отдалении от конца вентиляционного трубопровода.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.10.4.

Литература

1. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников / Б. П. Казаков, Е. В. Колесов, Е. В. Накаряков, А. Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 5-33. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_6_0_5. – EDN ATXUYB.
2. Semin, M., Faynburg, G., Tatsiy, A., Levin, L., & Nakariakov, E. (2024). Insights into turbulent airflow structures in blind headings under different ventilation duct distances. *Scientific Reports*, 14(1), 23768.
3. Cheng-Hu H., Kurabuchi T., Ohba1 M. Numerical study of cross-ventilation using two-equation RANS /*International Journal of Ventilation*. – 2005. – Т. 4. – №. 2. – С. 123-131.
4. Marshall E. M., Bakker A. Computational fluid mixing. Fluid Dynamics Fluent Incorporated, 2001, 154 p.
5. Каменских А. А. и др. Экспериментальные исследования проветривания тупиковой выработки нагнетательным способом при различном отставании вентиляционного трубопровода от груди забоя // *Горные науки и технологии*. – 2024. – Т. 9. – №. 1. – С. 41-52.

РАЗРАБОТКА, ПРОГРАММИРОВАНИЕ И ОТЛАДКА АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Семин М.А., Зайцев А.В., Колесов Е.В.

«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Главной задачей рудничной вентиляции является обеспечение требуемого воздухообмена в подземных выработках, направленного на разбавление пыли и вредных газов до безопасных концентраций и их выведение из рудника. С ростом глубины и протяжённости горных выработок, а также увеличением производственных мощностей, поддержание стабильного и энергоэффективного воздухораспределения становится всё более сложной инженерной задачей. В таких условиях возрастает значение систем автоматизированного контроля и математического моделирования, позволяющих оценивать и оперативно корректировать аэрогазовую обстановку в реальном времени.

Традиционно оценка эффективности вентиляции осуществляется посредством периодических ручных замеров скорости и депрессии воздуха, что не обеспечивает достаточной точности из-за высокой изменчивости параметров воздушной среды и случайных факторов — разрушения перемычек, изменения положения вентиляционных дверей, движения транспорта и др. Поэтому перспективным направлением является переход к интеллектуальным системам мониторинга рудничной атмосферы, включающим подсистему решения обратных задач воздухораспределения, позволяющую уточнять параметры модели вентиляционной сети по данным ограниченного числа датчиков [1, 2].

В основе моделирования лежит прямая задача воздухораспределения, определяемая системой уравнений Кирхгофа для расходов и давлений в ветвях сети. Однако реальные аэродинамические сопротивления выработок часто отличаются от проектных, что вызывает расхождения между расчётными и измеренными расходами воздуха. В этом случае необходимо решать обратную задачу воздухораспределения, заключающуюся в определении скорректированных значений сопротивлений ветвей по данным о расходах воздуха в отдельных выработках. Такая задача является некорректной в смысле отсутствия единственности и устойчивости решения и требует применения методов регуляризации.

В представленной работе разработан и программно реализован алгоритм решения обратной задачи воздухораспределения в вентиляционной сети рудника на основе регуляризации Тихонова. Метод обеспечивает устойчивое решение при малом числе измерений и позволяет минимизировать невязки между модельными и фактическими расходами воздуха. Минимизируемый функционал I включает два слагаемых: отклонение расчётных расходов от показаний датчиков и регуляризационный член, ограничивающий изменение аэродинамических сопротивлений относительно проектных значений:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i^m - Q_i^c}{Q_i^c} \right)^2}{n} + k_1 \sum_{j=1}^s \left(\frac{R_j - R_{0j}}{R_{0j}} \right)^2,$$

где Q_i^m — измеренный расход воздуха в выработке № i с датчиком, Q_i^c — модельный расход воздуха в выработке № i с датчиком, рассчитанный в результате прямой задачи воздухораспределения; n — количество выработок с датчиками расхода воздуха; s — общее количество выработок, в которых происходит корректировка сопротивлений; R_j — аэродинамическое сопротивление в выработке № j ; R_{0j} — исходное (проектное)

аэродинамическое сопротивление в выработке № j ; k_1 – безразмерный коэффициент регуляризации.

Минимизация функционала реализуется методом градиентного спуска, обеспечивающим постепенное уточнение сопротивлений до достижения заданной точности.

Для численной отладки алгоритма разработано несколько моделей вентиляционных сетей рудников. Одна из таких моделей – упрощённая модель вентиляционной сети медно-никелевого рудника Норильского региона, включающая 20 ветвей и одну вентиляторную установку, – представлена на рис. 1.

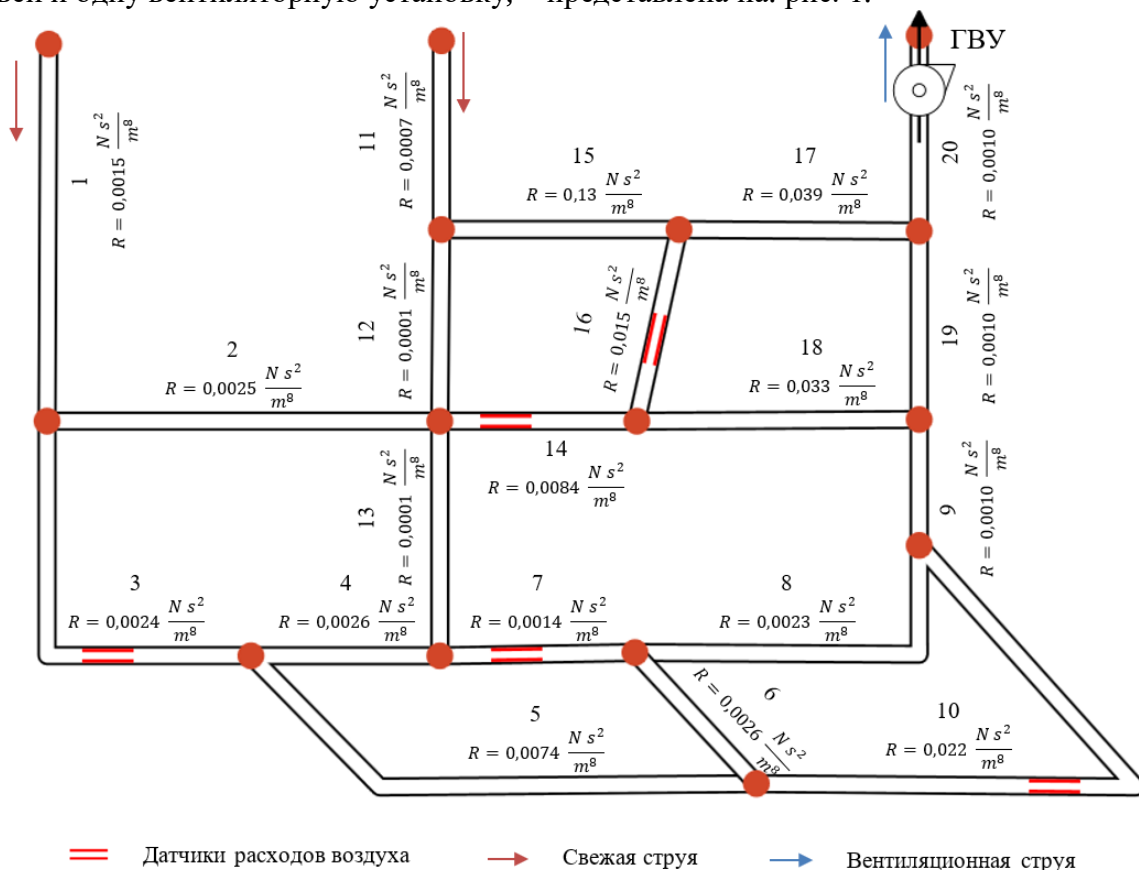


Рис. 1. - Схема вентиляционной сети рудника

В ряде ветвей установлены датчики расхода воздуха, на которых моделировались случайные отклонения измерений от проектных значений. Алгоритм выполнял итерационную корректировку сопротивлений до минимизации функционала ошибок. Расчёт прямой задачи на каждой итерации проводился по методу Андрияшева–Кросса [3].

Алгоритм был реализован в системе Wolfram Mathematica. Для повышения устойчивости процедуры настраивались следующие параметры: коэффициент регуляризации k_1 , шаг градиентного спуска α и пределы изменения сопротивлений.

Оптимальное значение k_1 определялось методом L-кривой, представляющей зависимость нормы остатка от нормы решения в логарифмических координатах (рис. 2). Точка перегиба L-кривой соответствует балансу между точностью и устойчивостью решения и используется как оптимальный параметр регуляризации. Предложенный способ задания величины k_1 обеспечивает возможность получения однозначного решения обратной задачи при минимальном увеличении дополнительной погрешности по расходам воздуха, возникающей за счет регуляризирующего члена I_2 . Это позволяет значительно

улучшить результаты интерпретации воздушораспределения в вентиляционных сетях по сравнению с предыдущими исследованиями [4].

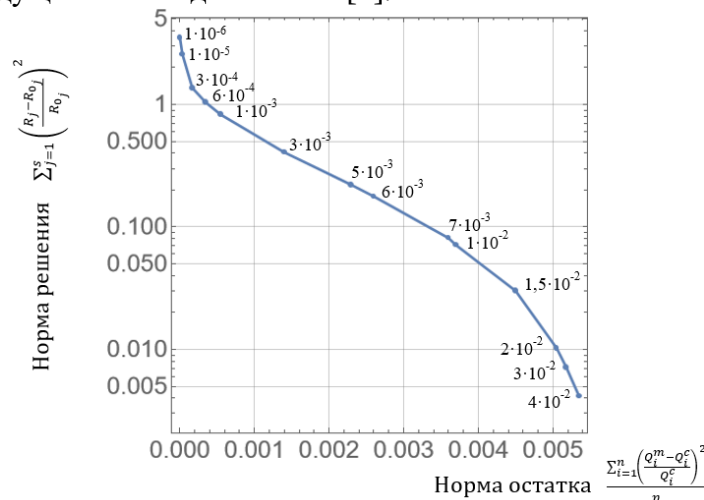


Рис. 2. - График L-кривой для определения коэффициента регуляризации

Для всех исследованных вентиляционных сетей рудников получено устойчивое и физически осмысленное распределение расходов, а расхождение между модельными и измеренными данными не превышало 5 %. Показано, что алгоритм корректно работает при различных конфигурациях сети и комбинациях расположения датчиков – это подтверждает его применимость как элемента систем мониторинга реальных шахт и рудников.

Алгоритм был интегрирован в вычислительный комплекс «Аэросеть» [5], предназначенный для моделирования и анализа вентиляционных сетей рудников. Это обеспечивает возможность его применения в составе действующих систем мониторинга рудничной атмосферы. В перспективе разработанный алгоритм решения обратной задачи воздушораспределения обеспечивает основу для интеллектуального мониторинга и управления вентиляцией в глубоких рудниках. Его применение позволит повысить достоверность расчётов, уменьшить энергозатраты и обеспечить безопасность подземных горных работ за счёт своевременной коррекции параметров вентиляционной сети.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.10.5.

Литература

1. Казаков Б. П., Исаевич А. Г., Мальцев С. В., Семин М. А. Автоматизированная обработка данных воздушно-депрессионной съемки для построения корректной математической модели вентиляционной сети рудников // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – №. 1. – С. 22-30.
2. Левин Л. Ю., Семин М. А. Оценка влияния местных сопротивлений на воздушораспределение в шахтах и рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – №. 2. – С. 120-130.
3. Круглов Ю. В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: дисс. ... д-ра техн. наук. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2012. – 341 с
4. Левин Л. Ю., Кормициков Д. С., Семин М. А. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 179-184. – EDN RMSLDD.

5. Аналитический комплекс «АэроСеть». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: свид. №2015610589. / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормицков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН — №2014613790 заявл. 24.04.2014; опубл. 14.01.2015, Реестр программ для ЭВМ. — 1 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ТРАНЗИТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Окатьев Р.С., Колесниченко И.В., Митрополит И.Ю.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФЦ УрО РАН

Жидкие металлы широко используются в металлургической промышленности и энергетике. Благодаря высокой электропроводности становится возможным бесконтактным образом управлять течениями жидких металлов посредством генерации электромагнитной силы. Разработка новых технологических устройств, таких как электромагнитные насосы, перемешиватели и расходомеры, должна включать тщательную проработку возможных конфигураций. Однако, высокая химическая агрессивность жидких металлов и их оптическая непрозрачность существенно снижают набор доступных экспериментальных методик для исследования гидродинамических процессов. По этой причине особо актуальной становится задача разработки и совершенствования математических моделей для исследования магнитогидродинамических процессов.

Разработанная в рамках работы математическая модель основывается на уравнениях электродинамики сплошных сред и гидродинамики. Поскольку магнитное поле, индуцированное движением проводящей среды, в рассматриваемом классе задач зачастую оказывается малым по сравнению с наложенным магнитным полем, система уравнений решается в рамках безындукционного приближения магнитной гидродинамики [1].

Во многих интересных с точки зрения технологических приложений задачах можно также считать, что генерируемые движением электропроводной среды токи малы по сравнению с наведенными. Это позволяет рассматривать задачу в рамках электродинамического приближения и разделить этапы решения электродинамической и гидродинамической подзадач. В рамках электродинамической подзадачи решаются уравнения электродинамики, записанные в терминах скалярного и векторного потенциалов. Расчетная область включает в себя ячейку с жидким металлом, генерирующие катушки, магнитопроводы и окружающее пространство, необходимое для замыкания полей. При использовании электродинамического приближения на этапе решения электродинамической подзадачи принимается, что распределение электромагнитных полей не зависит от скорости движения среды. Ключевым результатом решения этой подзадачи является распределение магнитного поля и электромагнитной силы в ячейке с жидким металлом. В гидродинамической подзадаче решается задача о транзитном течении жидкого металла под действием электромагнитной силы, вычисленной на этапе решения электродинамической подзадачи. Транзитное течение вводится в модель заданием профиля скорости на входном сечении расчетной области, либо заданием постоянного градиента давления в случае периодических граничных условий.

Дополнительно выполнено обобщение математической модели на случай неоднородной проводимости жидкого металла. Это может быть важным, поскольку жидкие металлы, используемые в технологических процессах, всегда имеют ненулевую долю примеси, проводимость которой может существенно отличаться от проводимости самого металла. Известно, что неоднородность электропроводности может приводить к изменению характеристик течения жидких металлов [2]. Для оценки влияния неоднородности свойств решена модельная задача о транзитном течении жидкого металла в канале плоской

геометрии под действием постоянного магнитного поля (рис. 1). Показано, что при значительной неоднородности электропроводности течение становится неустойчивым. Неустойчивость вызвана появлением вихревых структур (рис. 2а), рост которых приводит к разрушению исходного стационарного транзитного течения.

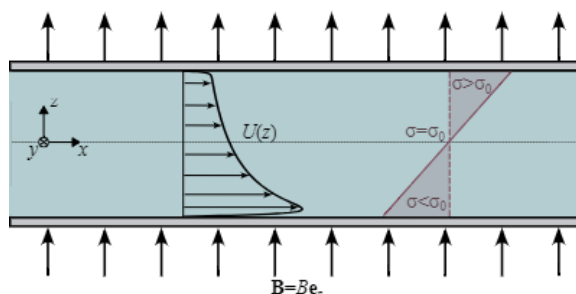


Рис. 1. - Схема модельной задачи о транзитном течении жидкого металла с неоднородной проводимостью в однородном внешнем магнитном поле

Также в рамках электродинамического приближения рассмотрена динамика локализованных азимутальных вихрей в канале цилиндрической геометрии. Вихри создаются электромагнитными силами, генерируемыми двумя индукторами вращающегося магнитного поля. Показано, что созданные вихри сохраняются после отключения индукторов и движутся вместе с транзитным течением (рис. 2б). При значительной интенсивности транзитного течения один из вихрей подавляется другим, что приводит к появлению устойчивой одновихревой структуры. Результаты исследования могут быть использованы при конструировании вихрепролетных бесконтактных расходомеров.

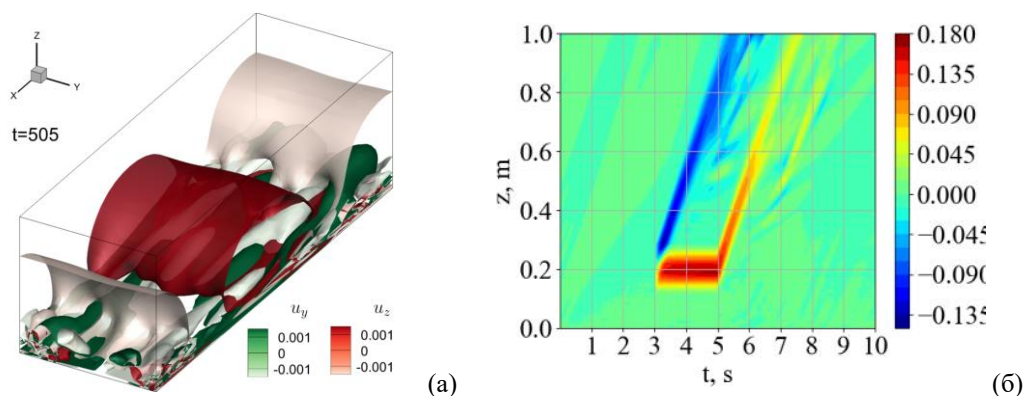


Рис. 2. – Результаты моделирования. Вихревые структуры, возникающие при транзитном течении жидкости с неоднородной проводимостью под действием постоянного магнитного поля (а). Пространственно-временная диаграмма распределения азимутальной скорости вихря, созданного индуктором вращающегося магнитного поля при умеренной интенсивности транзитного течения (б)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.9.1.

Литература

1. Davidson P.A. Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 555 p.
2. Окарьев Р.С., Фрик П.Г., Колесниченко И.В., Течение Гартмана в слое жидкости с пространственно-неоднородными свойствами. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». 2023. № 3. С. 34-42. <http://doi.org/10.14529/mmph230304>

МНОГООБРАЗИЕ РЕЖИМОВ ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВСТРЕЧНО-ВРАЩАЮЩИХСЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л., Полуянов А.О., Ельтищев В.А.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Контрвихревые течения – это специфический тип гидродинамических потоков, характеризующийся взаимодействием коаксиальных вихрей противоположной закрутки. Такие течения нашли своё применение в технической гидромеханике как средство рассеяния кинетической энергии высокоскоростного потока [1, 2]. В данной работе мы рассматриваем генерацию посредством электромагнитных сил контрвихревого течения в жидком металле, заполняющем круглый Т-образный канал. Такая геометрия рабочей области обусловлена как фундаментальными, так и прикладными задачами магнитной гидродинамики (МГД). С практической точки зрения, она соответствует задаче о перемешивании в ковше промежуточного литья при процессе полунепрерывного литья стали для повышения качества отливок и удалению нежелательных включений (шлаков, солей) [3]. Другой задачей является перемешивание электродов жидкометаллических батарей для их регенерации [4]. С фундаментальной точки зрения, рассматриваемая конфигурация позволяет изучать процессы возникновения природных макромасштабных атмосферных явлений в лабораторных условиях, используя МГД-модели торнадо [5].

Экспериментальная установка (рис. 1) включает в себя Т-образный канал 1 кругового сечения и пару коаксиально расположенных индукторов 2 и 3 вращающегося магнитного поля.

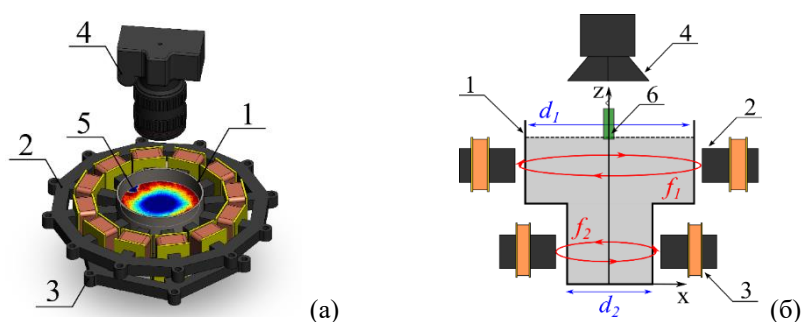


Рис. 1. - Экспериментальная установка: 1. канал, 2. верхний индуктор, 3. нижний индуктор, 4. камера, 5. поле скорости на поверхности металла, 6. датчик УДА: а) 3D модель экспериментальной установки; б) схема в сечении

Канал состоит из двух коаксиальных сообщающихся отрезков трубопровода диаметрами 200 и 100 мм. Высоты секций ячейки одинаковы и равны 150 мм, но ячейка заполнена до уровня $z = 250$ мм жидким галлиевым сплавом $\text{Ga}_{86.3}\text{Zn}_{10.8}\text{Sn}_{2.9}$ (вес. %). Свободная поверхность металла покрыта слоем раствора соляной кислоты и изопропилового спирта. Над каналом расположена камера 4, фиксирующая движение треков (пузырьков водорода) в тонком приповерхностном слое раствора с частотой 60 кадров/с. Для изучения структуры потоков в центре канала вертикально размещается датчик ультразвукового доплеровского анемометра 6 DOP 5000.

Структура течений, возникающих в канале, зависит от соотношения приложенных к верхней и нижней частям канала сил f_1 и f_2 , соответственно. В качестве безразмерного критерия, характеризующего интенсивность силового воздействия, вводится электромагнитный аналог числа Тейлора $Ta = \sigma B^2 \omega L^4 / 2\rho\nu^2$, где σ – электропроводность среды, B – амплитуда индукции магнитного поля, ω – частота магнитного поля, L – характерный размер, ρ – плотность металла и ν – его кинематическая вязкость. Был изучен ряд характерных гидродинамических структур, возникающих в канале при различных соотношениях Ta_1 и Ta_2 , где нижний индекс соответствует кольцу индуктора, создающего соответствующую величину силового воздействия (рис. 2). Диапазон изменения чисел Тейлора составлял: $0 \leq Ta_1 \leq 7 \cdot 10^{10}$, $0 \leq Ta_2 \leq 7 \cdot 10^9$.

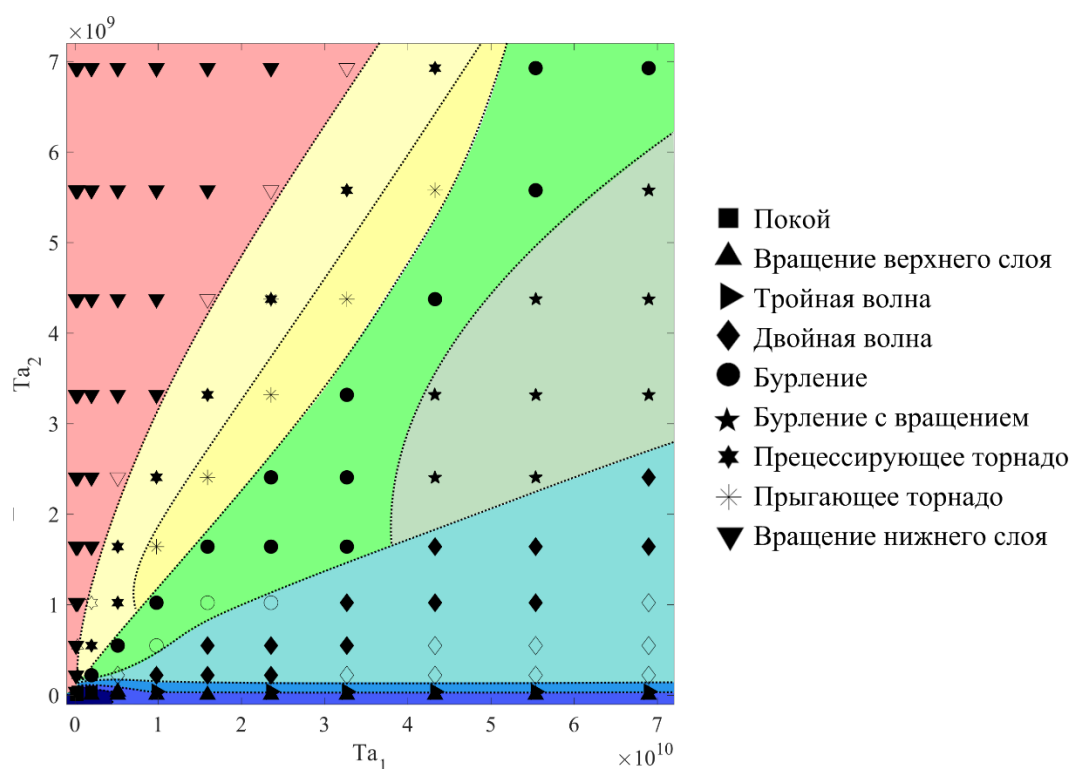


Рис. 2. - Карта режимов течения, наблюдаемых в Т-образной ячейке, в зависимости от параметров электромагнитного воздействия в верхней части ячейки Ta_1 и нижней части ячейки Ta_2

В случае если силовое воздействие на жидкий металл происходит со стороны лишь верхнего индуктора ($Ta_1 \neq 0, Ta_2 = 0$), в канале формируется крупномасштабное однородное вращение (рис. 3а). Оно происходит квази-твердотельным образом, радиальный профиль азимутальной компоненты скорости линеен вдоль всего радиуса канала. Максимальное значение азимутальной скорости достигает 200 мм/с. С увеличением силового воздействия, скорость течения возрастает, и свободная поверхность жидкости приобретает форму широкой воронки.

В случае приложения электромагнитного воздействия только к нижней части канала ($Ta_1 = 0, Ta_2 \neq 0$), основное течение возникает в удаленной от свободной поверхности области. За счёт сил вязкого трения вращательный момент передаётся в верхнюю половину канала и вызывает вращательное движение в приповерхностных слоях. Из-за увеличения диаметра верхней части канала, течение оказывается сосредоточено в центральной области цилиндра (рис. 3б). С увеличением величины силового воздействия, скорость течения возрастает, и свободная поверхность жидкости приобретает форму узкой глубокой воронки.

При соотношении чисел Тейлора $Ta_1/Ta_2 \approx 30 - 50$ в канале реализуется режим вращения с ярко выраженным волновым движением в приповерхностном слое. В этом режиме взаимодействие противоположно направленных азимутальных потоков приводит к генерации в приповерхностном слое двойной гидродинамической структуры (локальные максимумы скорости), движущиеся по окружности со скоростью, превышающей скорость основного квазитвердотельного движения (рис. 3в).

При дальнейшем повышении параметра Ta_2 реализуется нерегулярное течение сложной топологии. В промежуточных областях ($10 < Ta_1/Ta_2 < 20$) соотношения силовых параметров баланс сил не позволяет развиваться устойчивому волновому движению, и в то же время ни одна из компонент сил f_1 и f_2 не оказывается достаточно сильна, чтобы создать однородное вращение. Таким образом, возникает режим, при котором поверхность металла не вовлечена в крупномасштабное движение, но на поверхности хаотическим образом возникают мелкомасштабные гидродинамические структуры ("бурление"). Возникают и затухают слабые волны, образуются вихри с временем жизни порядка нескольких секунд (рис. 3г). Важно, что поверхность металла остаётся невозмущенной даже при больших величинах Ta_1 и Ta_2 .

Дальнейшее повышение Ta_2 приводит к затуханию бурления жидкости и образованию торнадоподобного вихря вблизи центральной оси канала. Режим наблюдается при $5 < Ta_1/Ta_2 < 10$. Насколько известно авторам, подобный режим ранее не был получен в экспериментальных работах с жидкими металлами. Ключевые особенности такого течения – это стабильность вихря и прецессия оси вращения (рис. 3д).

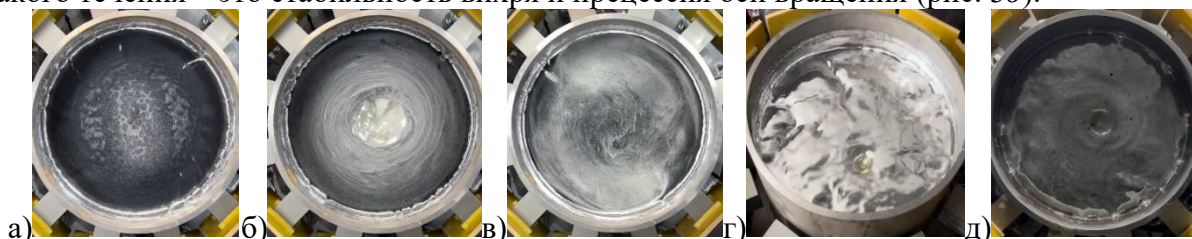


Рис. 3. - Фотографии режимов: а) широкая воронка, б) узкая воронка, в) двойная структура, г) бурление, д) торнадоподобный вихрь.

Также путём численного моделирования обнаружен режим течения, в котором в транзитном потоке из нескольких вихревых течений остается существовать уединенный локализованный вихрь, ось вращения которого сонаправлена с осью цилиндрического канала. Процесс может быть реализован только бесконтактным способом с помощью электромагнитных сил от вращающегося магнитного поля.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.9.2.

Литература

1. Leweke T., Le Dizes S., Williamson C.H.K. Dynamics and instabilities of vortex pairs // Annual Review of Fluid Mechanics. 2016. Vol. 48 (1). P. 507–541.
2. Churin P., Kapustin S., Orekhov G., Poddaeva O. Experimental studies of counter vortex flows modeling // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 756. P. 331–335.
3. Sahai Y. Tundish technology for casting clean steel: A review // Metallurgical and Materials Transactions B. 2016. Vol. 47 (4). P. 2095–2106.
4. Kelley D.H., Sadoway D.R. Mixing in a liquid metal electrode // Physics of Fluids. 2014. Vol. 26 (5).
5. Vogt T., Grants V., Eckert S., Gergeth G. Spin-up of a magnetically driven tornado-like vortex // Journal of Fluid Mechanics. 2013. Vol. 736. P. 614–662.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАКРУЧЕННЫХ ТРАНЗИТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ СРЕД, ЛЕЖАЩИХ В ОСНОВЕ МЕТОДИКИ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

Озерных В.С., Халилов Р.И., Шестаков А.В.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Закрученные и спиральные течения электропроводных сред в цилиндрических каналах активно изучаются в магнитной гидродинамике (МГД) [1]. Они представляют интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Такие течения могут быть созданы полностью бесконтактно. Это дает возможность исключить использование дополнительных устройств и деталей внутри цилиндрической трубы.

Существует большое количество электромагнитных методик для измерения скорости и расхода жидкого металла. Наибольшее внимание уделяется изучению процессов в кондукционных [2], индукционных [3] и Лоренцевых расходомерах [4]. Общим недостатком этих методик является необходимость их калибровки на отдельных стендах. Этого недостатка лишен корреляционный метод, который является одним из наиболее надежных способов измерения скорости и расхода жидкого металла. Он основан на корреляционном анализе некоторых случайных колебаний скорости или температуры потока. По сути, происходит измерение времени перемещения потоком какого-либо поддающегося измерению трассера (метки) от одного датчика до другого.

Исследуется поведение вихревого течения, которое создается источниками противоположно вращающегося магнитного поля в цилиндрическом канале. Математическая модель основана на уравнениях магнитной гидродинамики, которые описывают процесс взаимодействия электрических и магнитных полей с движущимися электропроводными средами.

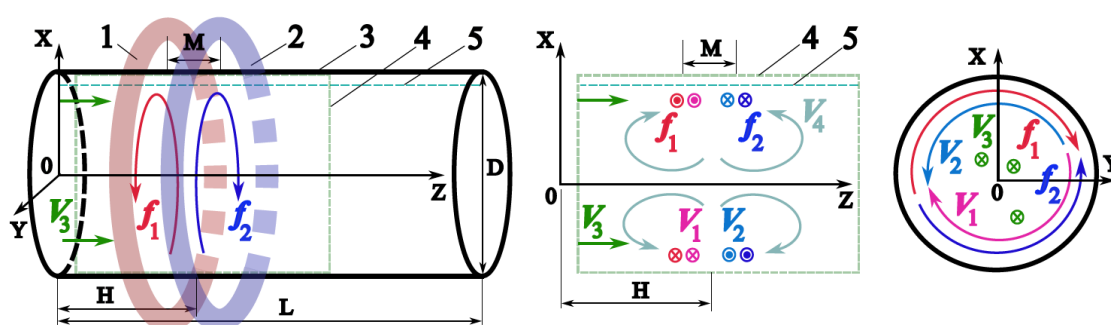


Рис. 1. Схема канала и течений в трехмерном виде, в сечении и со стороны входного торца: 1, 2 – индукторы вращающегося магнитного поля, 3 – канал, 4 – аксиальное сечение и 5 – отрезок для отображения результатов

Расчеты показали, что наиболее значимое изменение скорости происходит вблизи стенки канала. В случае наличия слабого транзитного течения после включения сил вихри раскручиваются и начинают взаимодействовать между собой. Первый по потоку вихрь набегаёт на второй вихрь, интенсивность которого снижается. После отключения сил пара вихрей переносится потоком, быстро теряя интенсивность и форму.

Наиболее интересная картина возникает в случае сильного транзитного течения. В этом случае границы вихря становятся более четкими, а его форма более совершенной. Наблюдается наиболее локализованный в пространстве уединенный вихрь, который переносится потоком почти без изменения структуры.

Результаты расчетов показали, зависимость интенсивности вихря от близко расположенных источников электромагнитных сил близка к линейной (рис. 2а) в исследуемом диапазоне параметров. Для оценки степени потери интенсивности вихревого течения выполнен корреляционный анализ сигналов в заданных парах точек вдоль канала. Расчеты показали, что при малых скоростях аксиального течения вихрь быстро затухает в процессе переноса по потоку. Это приводит к размыванию формы азимутальной скорости. Корреляционный анализ демонстрирует значительное снижение максимума функции корреляции даже при малом расстоянии (рис. 2б). Для сильных транзитных течений функция корреляции близка к единице на расстоянии до полуметра.

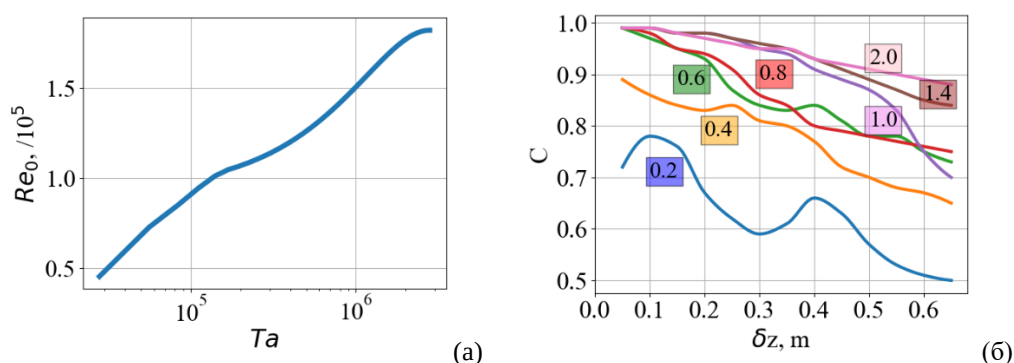


Рис. 2. (а) – Зависимость числа Рейнольдса от числа Тейлора, (б) – максимум функции корреляции от расстояния между точками измерения сигнала

Расчеты показали, что пульсация, созданная в одном месте трубопровода, переносится потоком и может быть зафиксирована измерительным модулем, расположенным ниже по потоку. Зная расстояние между модулями, и время прохождения пульсации можно определить скорость потока. На основе результатов разработана конфигурация бесконтактного электромагнитного расходомера для жидкого металла. Найдена область входных параметров, в которой форма распространяющейся пульсации оказывается наилучшей.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.9.3.

Литература

1. Davidson P.A. An introduction to magnetohydrodynamics. London: Cambridge University Press. 2001. 431p.
2. Sharma V., Vijaya Kumar G., et. al. Modeling of permanent magnet flowmeter for voltage signal estimation and its experimental verification // Flow Measurement and Instrumentation. 2012. Vol. 28. P.22-27. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.06.001>.
3. Poornapushpakala S., Gomathy C., Sylvia J.I., Babu B. Design, development and performance testing of fast response electronics for eddy current flowmeter in monitoring sodium flow // Flow Measurement and Instrumentation. 2014. Vol. 38. P.98-107. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.05.004>.
4. Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Force-free and contactless sensor for electromagnetic flowrate measurements // Magnetohydrodynamics. 2009. Vol. 45. Iss. 3. P.451-458.

ДВОЙНАЯ ДИФфуЗИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ПЛОСКОМ СЛОЕ С ГРАНИЦАМИ НИЗКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Прокопьев С.А., Любимова Т.П.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

В работе численно исследуется двойная диффузионная конвекция в плоском горизонтальном слое жидкости с границами малой теплопроводности. Данная задача имитирует поведение углеводородной смеси, окруженной пористыми горными породами, что является частью более общей задачи по изучению конвекции многокомпонентных смесей в синклинальной геологической складке.

При теоретическом исследовании неизо термических задач во многих случаях делается допущение, что окружающие исследуемую жидкость твердые границы обладают гораздо большей теплопроводностью, чем рассматриваемая жидкость. Данного рода предположение позволяет задать условие первого рода (условие Дирихле) в качестве граничного условия для поля температуры в краевой задаче для системы дифференциальных уравнений в частных производных [1]. На практике данное предположение выполняется в большинстве случаев, однако обратная ситуация, когда теплопроводность жидкости превышает теплопроводность твердых границ, также является достижимой [2]; последнее предположение, в свою очередь, приводит к граничным условиям второго рода (условие Неймана), при котором на твердых границах задается тепловой поток.

В качестве математической модели для численного исследования конвекции бинарных смесей используется система уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска, уравнение теплопроводности и уравнение диффузии [1]. В работе применяется линейный анализ устойчивости для анализа механического равновесия бинарной жидкости (с помощью метода пристрелки [3]) и прямое численное моделирование (с помощью метода конечных разностей в переменных функция тока-завихренность [4]). Рассматривается характерная жидкая смесь с числом Прандтля $Pr = 7$ и числом Льюиса $Le = 130$. Поведение системы исследуется при различных значениях числа Релея (Ra) и концентрационного числа Релея (Ra_S).

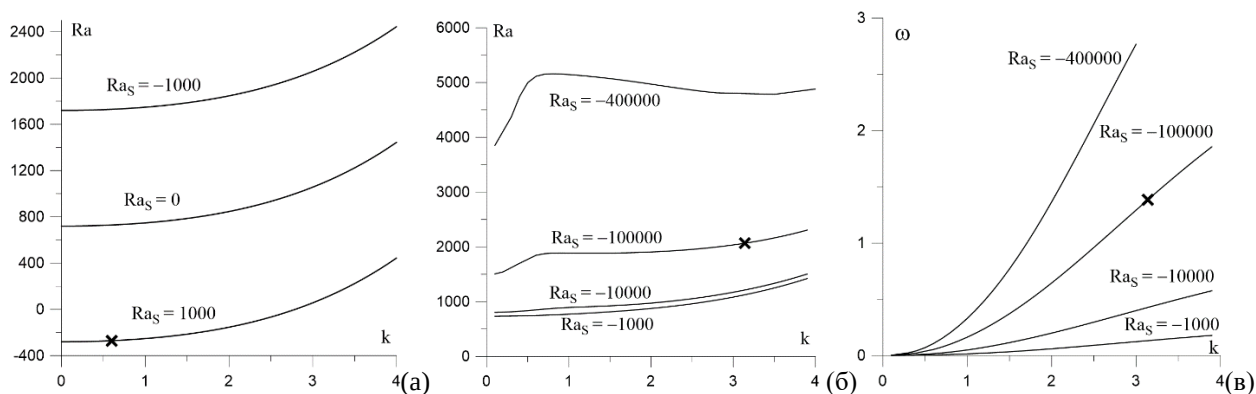


Рис. 1. – Нейтральные кривые (зависимость числа Релея от волнового числа при декременте возмущений $\lambda = 0$) для монотонной неустойчивости (а), колебательной неустойчивости (б); зависимость частоты от волнового числа в случае колебательной неустойчивости (в).

На рис. 1-(а) представлены типичные нейтральные кривые монотонных режимов неустойчивости, показывающие зависимость числа Релея (Ra) от волнового числа (k). Во всех случаях нейтральные кривые напоминают параболическую зависимость от k , в том числе для более высоких значений Ra_S , не изображенных на рис. 1, с минимумами при $k \rightarrow 0$, что означает, что длинноволновые режимы неустойчивости доминируют для бинарных смесей. В общем случае, порог длинноволновой монотонной неустойчивости определяется формулой $Ra = 720 - Ra_S$.

На рис. 1-(б) показаны нейтральные кривые для колебательной неустойчивости, которая существует при отрицательных значениях Ra_S ; на рис. 1-(в) представлена зависимость частоты колебаний от волнового числа наиболее опасных возмущений (что соответствуют значениям Ra на рис. 1-(б)). Несмотря на небольшие отклонения от параболической формы, нейтральные кривые в случае колебательной неустойчивости также имеют минимум при $k \rightarrow 0$, т.е. неустойчивость длинноволновая.

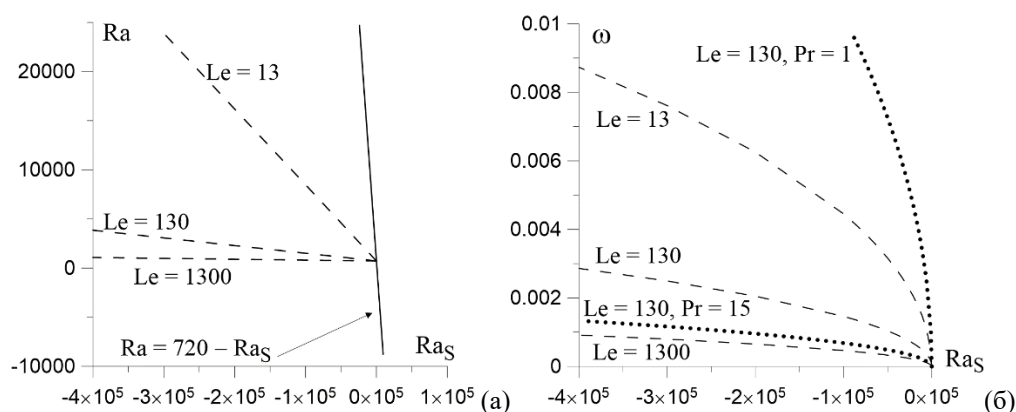


Рис. 2. Карта устойчивости ($Ra - Ra_S$)-(а), сплошные кривые – монотонная неустойчивость, штриховые линии – колебательная. Зависимость частоты (ω) от Ra_S для разных параметров – (б).

Сводные результаты линейной теории устойчивости представлены на рис. 2, где изображены критические параметры задачи в случае длинноволновой неустойчивости. Нелинейные расчеты подтвердили пороги возникновения конвекции, предсказанные линейной теорией, однако было найдено, что длинноволновой характер неустойчивости существует лишь вблизи порога возникновения конвекции, с увеличением надкритичности происходит трансформация к коротковолновым модам.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.1.

Литература

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 С.
2. Horai, K. Thermal conductivity of rock-forming minerals // Journal of Geophysical Research. 1971. Vol. 76. P. 1278–1308. <https://doi.org/10.1029/JB076i005p01278>
3. Лобов Н.И., Любимов Д.В., Любимова Т.П. Решение задач на ЭВМ: учеб.-метод. пособие. Пермь: Перм. ун-т, 2007. 82 С.
4. Тарунин Е.Л. Численный эксперимент в задачах свободной конвекции. Иркутск. Изд-во Ирут. Ун-та, 1990. 228 С.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ В СИСТЕМАХ СЛОЕВ РАЗНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ, ИМИТИРУЮЩИХ СИНКЛИНАЛЬНУЮ ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СКЛАДКУ

Любимова Т.П., Шубенков И.С., Ожгибесова Н.А.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Подземные месторождения нефти представляют собой пористые слои, состоящие в том числе из разных горных пород, насыщенные жидкими и газообразными углеводородами. Пластические деформации слоев горных пород приводят к образованию складок. Если изгиб слоев направлен выпуклостью вверх (в ядре залегают более древние слои, а на крыльях – более молодые), то складка называется антиклинальной [1]. Наличие геотермального градиента обуславливает возникновение конвективных процессов, а, значит, и перемешивание компонент углеводородной смеси [2-4].

Крылья геологической складки можно представить в виде системы наклонных слоев пористой среды. При изучении конвекции в наклонном слое пористой среды обычно рассматривается случай постоянных разных температур на границах слоя. В этом случае состояние равновесия невозможно. При любых перепадах температур существует стационарное основное течение, а при увеличении перепада температур в результате потери устойчивости этого течения возникает вторичное течение, накладывающееся на основное. В работах [5, 6] исследовано возникновение конвекции в наклонном пористом слое при вертикальном градиенте температуры. Показано, что при любых углах наклона слоя наиболее опасными являются трехмерные возмущения в виде продольных конвективных валов.

Любимова и др. [7] исследовали трехмерную конвекцию бинарной смеси с учётом эффекта Соре в трехслойной пористой системе, имитирующей антиклинальную геологическую складку (Рис. 1), под действием вертикального температурного градиента. В результате линейного анализа было установлено, что при любом угле наклона слоя наиболее опасными возмущениями являются продольные валы (валы с осями, направленными вдоль слоя и перпендикулярными оси, относительно которой слой наклонён) с ненулевым волновым числом. При этом, наличие примеси может изменять порог конвекции в обоих направлениях в зависимости от угла наклона слоя. В результате нелинейных расчётов было установлено, что при малых проницаемостях всех слоев возникающее течение имеет длинноволновой характер. С увеличением проницаемости среднего слоя течение принимает вид ячеистых продольных валов.

Настоящая работа является продолжением исследования [7]. В ней, в частности, рассматривается синклинальная складка. В предыдущей работе проницаемость внешних слоёв устанавливалась ниже порогового значения, таким образом, они фактически не участвовали в конвекции. В настоящей работе рассматривается более широкий диапазон соотношений проницаемостей слоёв, а также проводится линейный анализ трехслойной системы.

Моделирование проводится в рамках уравнений Дарси-Буссинеска [8] с учетом эффекта Соре. Границы расчетной области твердые, непроницаемые для вещества. На верхней и нижней границах задаётся распределение температуры, соответствующее строго вертикальному градиенту (среднему геотермальному градиенту на глубинах

залегания нефти). Боковые границы считаются теплоизолированными. Для концентрации на внешних границах задается нулевой поток вещества. На границах между слоями считаются выполненными условия непрерывности давления, нормальной компоненты скорости, температуры, концентрации, теплового потока, потока вещества.

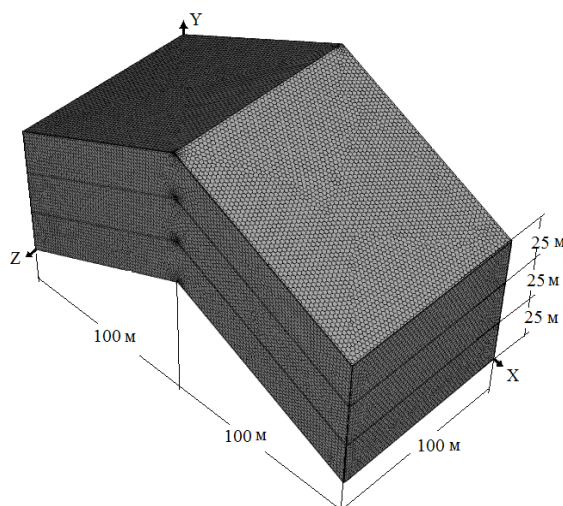


Рис. 1. – Модель антиклинальной складки

Сначала было проведено решение линейной задачи для системы, состоящей из трёх наклонных пористых слоёв бесконечной протяженности и разной проницаемости, насыщенных бинарной смесью. Вводился параметр трёхмерности $\zeta = k_x/k$ ($k^2 = k_x^2 + k_z^2$, k_x и k_z – волновые числа в направлениях x и z) [6]. Численное исследование проводилось в частности для коэффициента разделения $\psi = 0.694$ и числа Льюиса $Le = 150$, соответствующих параметрам смеси тетралина (50%) и додекана (50%), а также относительной проницаемости слоёв $K_p = 0.1$ (внутренний слой в 10 раз более проницаем, чем внешние), где $K_p = K_{in}/K_{ex}$.

Как видно из Рис. 2, абсолютный минимум критического числа Рэлея во всем диапазоне углов наклона слоя реализуется для возмущений с $\zeta = 0$ (продольные валы, т.е. валы с осями, параллельными оси x). Это имеет место при любых значениях K_p . При переходе через $\zeta = 0.97$ кривые меняют характер наклона, что сопровождается скачком. Это связано с изменением локального минимума на нейтральных кривых.

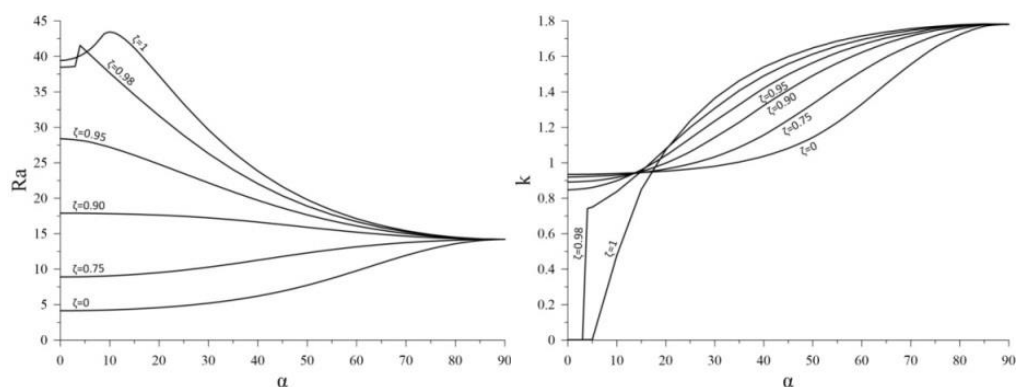


Рис. 2 – Зависимость минимального критического Ra (слева) и критического k (справа) от α при различных значениях ζ ($\psi = 0.694$, $K_p = 0.1$)

При низкой проницаемости слоёв и $K_p = 0.1$ наблюдается крупномасштабное плоскопараллельное течение, в большей степени сконцентрированное в центральном слое, однако также захватывающее и менее проницаемые внешние слои. Движение жидкости вдоль оси z отсутствует. При повышении проницаемости слоёв, а также при более высоком $K_p = 0.2$ наблюдается крупномасштабное плоскопараллельное течение с наложенными на него продольными валами (трёхвихревая структура) (Рис. 3). Скорость движения жидкости вдоль оси z становится отличной от нуля, т.е. имеет место полностью трёхмерное течение. При данном K_p основное движение жидкости происходит во внешних слоях, несмотря на то, что они менее проницаемы, чем внутренний слой.

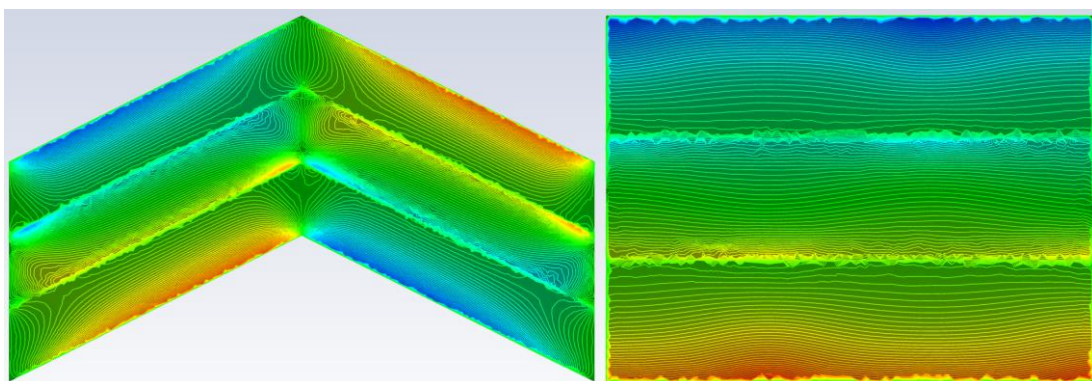


Рис. 3 – Поля компоненты скорости V_x в плоскостях XY и YZ ($K_{in} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $K_{ex} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.1

Литература

1. Михайлов А. Е. Структурная геология и геологическое картирование. М.: Недра, 1984. 464 с.
2. Szulczewski M., Hesse M., Juanes R. Carbon dioxide dissolution in structural and stratigraphic traps // Journal of Fluid Mechanics. 2013. Vol. 736. P. 287-315. <https://doi.org/10.1017/jfm.2013.511>
3. Baghooee H., Montel F., Galliero G., Yan W., Shapiro A. A new approach to thermal segregation in petroleum reservoirs: Algorithm and case studies // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 201. no 108367. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108367>
4. Parameswari K., Mudgal B. V. Assessment of contaminant migration in an unconfined aquifer around an open dumping yard: Perungudi a case study // Environmental Earth Sciences. 2015. Vol. 74. №7. P. 6111-6122. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4634-x>
5. Lyubimova T. P., Muratov I. D., Shubenkov I. S. Onset and non-linear regimes of convection in an inclined porous layer subjected to vertical temperature gradient // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34. no 094114. <https://doi.org/10.1063/5.0104575>
6. Shubenkov I., Lyubimova T., Sadilov E. Three-dimensional convection in an inclined porous layer subjected to vertical temperature gradient // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2024. Vol. 20. № 5. P. 1093-1102. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.050167>
7. Tatyana Lyubimova, Ivan Shubenkov, Nadezhda Ozhgibesova. Soret-Induced Convection in a Layered Porous Medium Simulating an Anticlinal Geological Fold Under the Action of a Geothermal Temperature Gradient // Heat Transfer. 2025. 54:2251–2264 2251. <https://doi.org/10.1002/hjt.23289>
8. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. New York: Springer, 2013. 778 p.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ, ПОДОГРЕВАЕМОЙ СНИЗУ

Любимова Т.П., Крапивина Е.Н., Ковалевская К.В.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Известно, что в случае ньютоновской жидкости потеря устойчивости механического равновесия в квадратной области при подогреве снизу связана с развитием одновихревых возмущений, вторая мода неустойчивости соответствует возмущениям двухвихревой структуры. В настоящей работе исследованы устойчивость механического равновесия и надкритические режимы свободной тепловой конвекции вязкоупругой жидкости в горизонтальном цилиндре квадратного сечения с адиабатическими боковыми границами, при подогреве снизу, в статическом и модулированном полях тяжести. Для описания реологического поведения жидкости использована модель Олдройда-В [1].

Границы линейной устойчивости механического равновесия по отношению к различным модам неустойчивости получены путем анализа данных прямого численного моделирования временной эволюции возмущений на основе линеаризованных нестационарных уравнений малых возмущений. Обнаружено, что, в случае статического поля тяжести, для жидкости Олдройда В, в отличие от ньютоновской жидкости, существует диапазон значений реологических параметров, в котором бифуркационные поверхности для возмущений разной пространственной симметрии (одновихревых и двухвихревых возмущений) пересекаются (Рис.1). С помощью прямого численного моделирования на основе полной нелинейной системы уравнений исследовано поведение жидкости в окрестности таких пересечений (Рис.2).

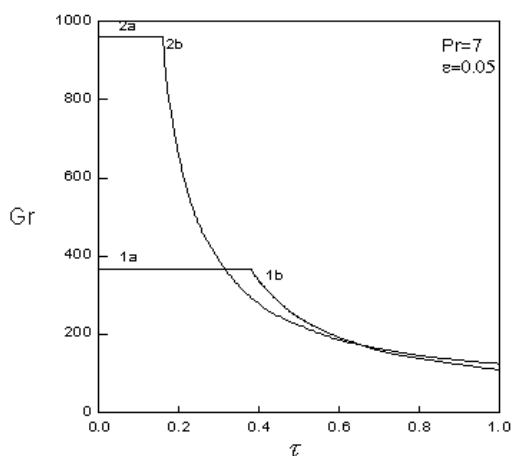


Рис. 1. - Границы устойчивости механического равновесия по отношению к одновихревым (кривые 1a и 1b) и двухвихревым (кривые 2a и 2b) течениям: а — границы неустойчивости к монотонным возмущениям, б — границы неустойчивости к колебательным возмущениям

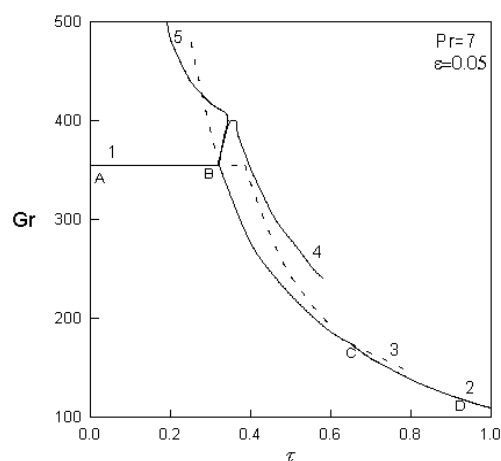


Рис. 2. - Диаграмма нелинейных режимов конвекции. Кривые 1, 2 и 3 границы линейной устойчивости по отношению к монотонным одновихревым возмущениям, колебательным одновихревым возмущениям и колебательным двухвихревым возмущениям соответственно. Кривые 4 и 5 - линии вторичных бифуркаций.

Исследовано влияние модуляции тяжести на устойчивость механического равновесия и надкритические режимы конвекции. Расчеты показали, что в зависимости от значений параметров развитие неустойчивости может быть связано с синхронными, субгармоническими или квазипериодическими возмущениями. Определены границы линейной устойчивости основного состояния по отношению к различным типам возмущений. Получены карты устойчивости, определяющие диапазоны параметров, в которых модуляция оказывает стабилизирующее или дестабилизирующее действие. Установлено, что в некотором диапазоне параметров двухвихревые возмущения, которые не являются самыми опасными в отсутствие модуляции тяжести, становятся причиной возникновения неустойчивости механического равновесия в модулированном поле тяжести (Рис.3). Обнаружено слияние зон параметрической неустойчивости по отношению к синхронным возмущениям, осциллирующим с нулевым средним, с основной зоной неустойчивости относительно синхронных возмущений, осциллирующих с ненулевым средним (Рис.4). Изучено влияние модуляции тяжести на тип возбуждения конвекции; численно найдены неустойчивые решения в случае подкритической бифуркации. С помощью численного решения полных нелинейных уравнений определены структура и характеристики нелинейных режимов конвекции.

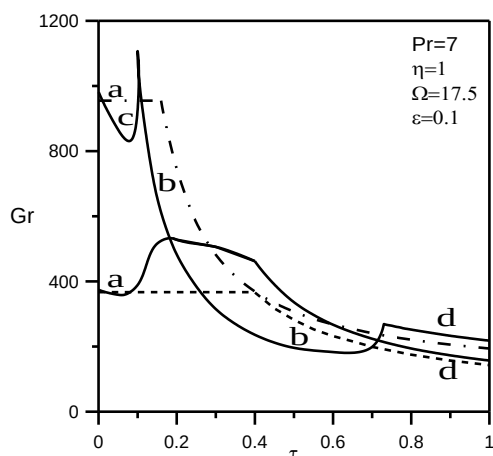


Рис.3 Границы линейной устойчивости на плоскости параметров число Грасгофа Gr – число Дебора τ для $\eta=1$, $\Omega=17.5$, $\varepsilon=0.3$; штриховые и штрихпунктирные линии соответствуют границам устойчивости в отсутствие модуляции для одновихревой и двухвихревой мод; а – колебания из основной зоны неустойчивости, b – субгармонические решения, c – синхронные решения, d – квазипериодические решения

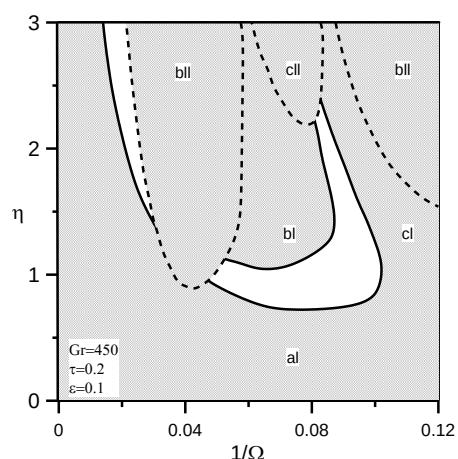


Рис.4 Карта устойчивости на плоскости параметров обратная частота модуляции $1/\Omega$ – амплитуда модуляции η для $Gr=450$, $\tau=0.2$, $\varepsilon=0.1$; сплошные линии соответствуют границам устойчивости для одновихревой моды, штриховые – для двухвихревой моды; al – основная зона неустойчивости, bl, bll – субгармонические резонансные зоны, cl, cll – синхронные резонансные зоны

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов теплопереноса в биологических и технологических процессах с участием вязкоупругих жидкостей и управления этими процессами с помощью переменных внешних полей.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.2.

Литература

1. Oldroyd J.G. On the Formulation of Rheological Equations of State // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1950. Vol. 200. P. 523-541. <https://doi.org/10.1098/rspa.1950.0035>.

СМЕШАННАЯ ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ С ДВИЖУЩЕЙСЯ ВЕРХНЕЙ СТЕНКОЙ ПРИ ПОДОГРЕВЕ СНИЗУ

Шарифулин В.А., Любимова Т.П.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Рассматривается смешанная тепловая конвекция несжимаемой вязкоупругой жидкости в горизонтальном цилиндре квадратного сечения, подогреваемом снизу. Верхняя и нижняя границы поддерживаются при постоянных разных температурах, боковые границы являются адиабатическими. Верхняя граница движется.

Используется модель в приближении Буссинеска с уравнениями для скорости, давления, температуры и тензора дополнительных напряжений (модель Олдройда-В). Задача решается в двумерной постановке.

В задаче вводятся следующие критерии подобия: отношение сил плавучести к вязким силам (число Грасгофа) Gr , отношение импульсной к тепловой диффузии (число Прандтля) Pr , безразмерное время релаксации напряжений τ (число Дебора), безразмерное время запаздывания деформаций τ_r , их отношение $\epsilon = \tau_r / \tau$, безразмерная скорость движения верхней стенки (число Рейнольдса) Re .

В работе [1] исследованы устойчивость механического равновесия и надкритические режимы свободной тепловой конвекции жидкости Олдройда В в горизонтальном цилиндре квадратного сечения с адиабатическими боковыми границами, при подогреве снизу. Для жидкостей Олдройда В с отношениями времени запаздывания деформаций к времени релаксации напряжений, ϵ , меньшими 0.1, обнаружены пересечения бифуркационных поверхностей для возмущений разной пространственной симметрии (одновихревых $\Gamma = 1$ и двухвихревых $\Gamma = 1/2$ возмущений), что приводит к существованию диапазона значений числа Деборы τ , в котором наиболее опасными являются двухвихревые колебательные возмущения.

Это аналогично [2] существованию гистерезиса между режимами нормальной (одновихревой, $\Gamma = 1$) и аномальной (двухвихревой, $\Gamma(Re, Gr) > 1$) смешанной конвекции при изменении скорости движения верхней стенки (Re). Отличие двухвихревых режимов состоит в направлении стратификации вихрей горизонтальная в первом случае и вертикальная – во втором и симметрии: в первом случае вихри зеркально симметричны и имеют одинаковые пропорции, во втором случае вихри не симметричны и имеют разные пропорции.

Движение верхней стенки нарушает центральную симметрию, присущую одновихревым режимам [1], в меньшей степени, чем зеркальную симметрию двухвихревых режимов. Таким образом, вопрос о характере взаимодействия этих эффектов является фундаментальным для понимания течения жидкости, в котором сочетаются указанные факторы. В то же время диапазон технических и природных приложений, где сочетаются плавучесть, вязкоупругие свойства жидкости и движение границы полости, простирается от микрофлюидики до геофизики [3-7].

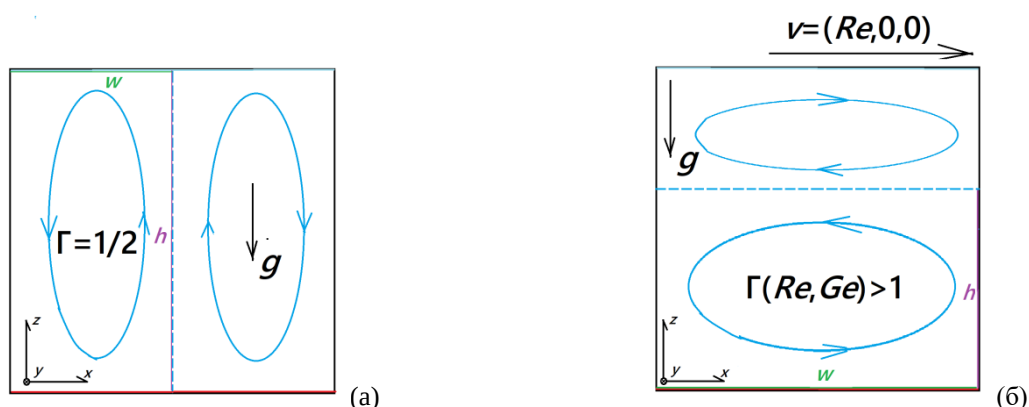


Рис. 1. – Схематичное сравнение двухвихревых течений в квадратной полости подогреваемой снизу: (а) конвекции вязкоупругой жидкости [1] и (б) смешенной конвекции ньютоновской жидкости [2]. $\Gamma = w / h$

В окрестности пересечения бифуркационных поверхностей различной пространственной симметрии ($\epsilon < 0.1$) влияние медленного движения верхней стенки ($Re \sim 1$) исследовано в рамках маломодовой модели с построением бифуркационной кривой. Для произвольных Re посредством решения полных уравнений Навье—Стокса и теплопроводности методом конечных разностей построена диаграмма режимов на плоскости (Re, Gr) и получена зависимость $Nu(Re, Gr)$.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.2.

Литература

1. Lyubimova T. P., Krapivina E. N. Onset and non-linear regimes of convection of viscoelastic fluid in a square cavity heated from below //Physics of Fluids. 2025. Vol. 37. N. 7. P. 073133. <https://doi.org/10.1063/5.0278549>
2. Sharifulin V. A. et al. The Boundaries of the Existence of An Anomalous Convective Air Flow in a Square Cavity with a Moving Lid //Microgravity Science and Technology. 2025. Vol. 37. N. 1. P. 13. <https://doi.org/10.1007/s12217-025-10168-6>
3. Grillet A. M. et al. Modeling of viscoelastic lid driven cavity flow using finite element simulations //Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 1999. Vol. 88. N. 1-2. P. 99-131. [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(99)00015-4)
4. Kefayati G. H. R., Tang H. MHD mixed convection of viscoplastic fluids in different aspect ratios of a lid-driven cavity using LBM //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 124. P. 344-367. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.083>
5. Gupta S., Chauhan A., Sasmal C. Influence of elastic instability and elastic turbulence on mixed convection of viscoelastic fluids in a lid-driven cavity //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 186. P. 122469. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122469>
6. Sousa R. G. et al. Lid-driven cavity flow of viscoelastic liquids //Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2016. – T. 234. – С. 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2016.03.001>
7. Boaro A., MacDowall G., Lappa M. Symmetry properties and bifurcations of viscoelastic thermovibrational convection in a square cavity //Physical Review E. – 2023. – T. 108. – №. 6. – С. 065101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.108.065101>

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА ФРОНТ ВЫТЕСНЕНИЯ МЕЖДУ НЬЮТОНОВСКОЙ И ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ

Любимова Т.П., Иванцов А.О., Кучинский М.О.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Во многих технологических процессах встречается эффект вязкого пальцеобразования - гидродинамической неустойчивости, известной также как неустойчивость Саффмана-Тейлора [1]. Когда менее вязкая жидкость начинает вытеснять более вязкую, неустойчивость проявляется в форме пальцеобразных узоров, искажающих фронт вытеснения. Такое явление отрицательно сказывается на эффективности технологических процессов: его возникновение нежелательно при нефтедобыче, фильтрации через пористые материалы или в биологических системах, где имеет место взаимодействие жидкостей на границе раздела [2].

Из-за сложной микроскопической структуры реальной пористой среды создание математической модели является сложной задачей; по этой же причине возникают трудности с визуализацией процесса во время эксперимента. В связи с этим, вытеснение потока через пористую среду обычно изучается с использованием ячейки Хеле-Шоу, представляющей из себя две соединенных между собой пластины с небольшим зазором между ними, заполненным вязкой жидкостью [3, 4]. Использование ячеек Хеле-Шоу в эксперименте позволяет сопоставить его результаты с численной моделью в двумерной постановке. В качестве одного из способов воздействия на динамику вязких пальцев в работе [5] рассматривалась возможность использования вибраций.

Целью настоящей работы являлось численное исследование влияния периодического воздействия на фронт вытеснения между ньютоновской и неньютоновской жидкостями в ячейке Хеле-Шоу, моделирующей однородную пористую среду. Физические параметры ньютоновской жидкости соответствуют воде. Реологические свойства неньютоновской жидкости описываются в рамках модели Гершеля–Балкли–Папанастиасиу [6].

Модель Гершеля–Балкли–Папанастиасиу представляет собой обобщение классических моделей вязкопластического течения. Она используется для описания жидкостей, обладающих пороговым напряжением текучести, то есть материалов, которые ведут себя как твёрдое тело до тех пор, пока приложенные касательные напряжения не превысят некоторого критического значения. После преодоления этого порога материал начинает течь, и его вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига. Примеры таких материалов включают буровые и цементные растворы, суспензии, шламы, пасты, продукты питания и геофлюиды.

Классическая модель Гершеля–Балкли [7] записывается в виде зависимости касательных напряжений от скорости сдвига:

$$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, τ_y – предел текучести, K – коэффициент консистенции, n – показатель степенного закона. Однако такая форма вызывает трудности при численном моделировании, поскольку для скоростей сдвига, близких к нулю, вязкость становится бесконечной, что создаёт сингулярность в уравнениях движения. Для устранения этой

проблемы Папанастасиу предложил экспоненциальную регуляризацию, позволяющую плавно переходить от «не текучего» состояния к текучему. Регуляризованная модель Гершеля–Балкли–Панастасиу выражается через эффективную вязкость [6]:

$$\mu_{eff} = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \left[1 - e^{-m_p \dot{\gamma}} \right] + m \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{ref}} \right)^{n-1}. \quad (2)$$

Здесь m_p – параметр регуляризации Папанастасиу, m – коэффициент консистенции, $\dot{\gamma}_{ref}$ – опорная скорость сдвига. Эффективная скорость сдвига определяется как

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\mathbf{s}:\mathbf{s}}, \quad \mathbf{s} = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right], \quad (3)$$

где $\mathbf{u}$ – вектор скорости потока, $\mathbf{s}$ – тензор скорости деформации.

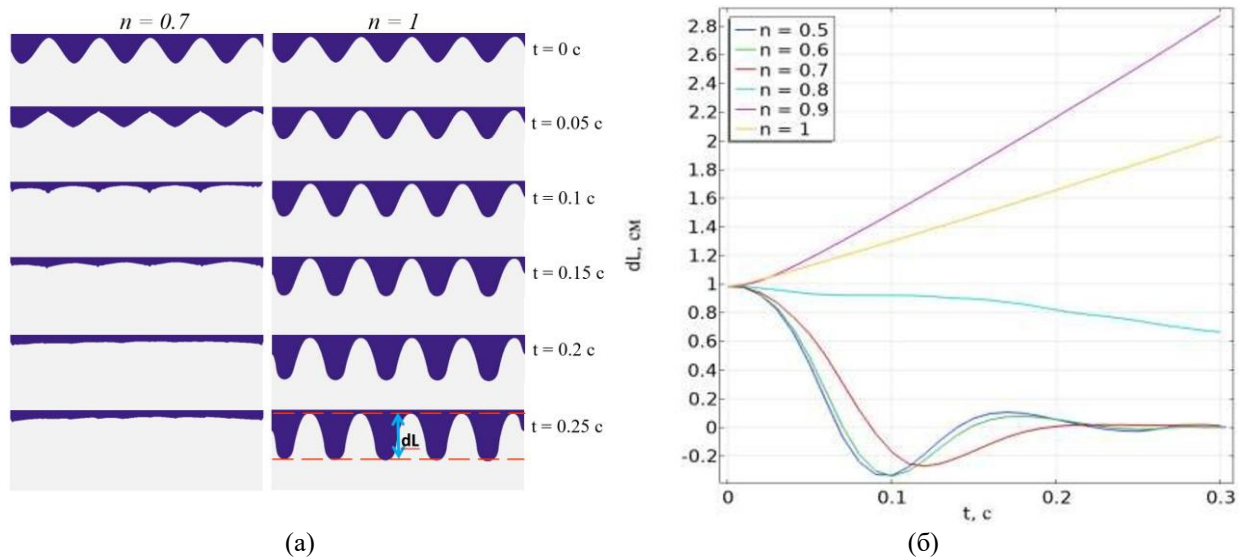


Рис. 1. - Эволюция формы фронта вытеснения в центральной части расчетной области (а) и зависимость максимального размера пальцев от времени (б) при различных значениях показателя степени n

Динамика рассматриваемой системы описывается уравнениями Навье-Стокса и неразрывности, которые в системе отсчета, связанной со стенками ячейки, имеют вид:

$$\rho_j \left(\frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial t} + (\mathbf{u}_j \nabla) \mathbf{u}_j \right) = -\nabla P + \mu_j \Delta \mathbf{u}_j - \frac{12\mu_j}{d_z^2} \mathbf{u}_j + a\omega^2 \cos(\omega t) \nabla z \quad (4)$$

$$\text{div} \mathbf{u}_j = 0 \quad (5)$$

где $d_z^2/12$ – коэффициент проницаемости ячейки Хеле-Шоу, $a\omega^2 \cos(\omega t)$ – описывает влияние вибраций вдоль оси z с частотой a и амплитудой ω ; индекс j нумерует жидкости.

В начальный момент времени задавалось возмущение фронта вытеснения по гармоническому закону (см. рис. 1а). При этом жидкости в начальный момент считались неподвижными. На неподвижных вертикальных и горизонтальных границах полости ставилось условие прилипания. На горизонтальных границах задавались постоянные значения давления: сверху $P_1 = 1$ кПа, снизу $P_2 = 0$ Па. На поверхности раздела считались выполненными кинематическое условие, динамическое условие и условие непрерывности нормальной компоненты скорости. Расчетная область представляет собой ячейку Хеле-Шоу с прямоугольной геометрией. Её размеры составляют 0.1 м в длину, 0.5 м в высоту и $2 \cdot 10^{-8}$ м в толщину (зазор между пластинами d_z).

Для численного решения задачи применялся пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics. Расчеты проводились с использованием равномерной по пространству сетки с треугольными элементами, количество которых составило $1.1 \cdot 10^5$. Проведенные верификационные расчеты на более мелкой сетке подтвердили достаточность выбранной пространственной дискретизации для достижения приемлемой точности численного решения.

Численное моделирование показало, что в отсутствие вибраций, поведение межфазной границы соответствует классическому сценарию неустойчивости Саффмана–Тейлора, приводящему к формированию пальцеобразных структур, характерных для вытеснения вязкой жидкости. Под действием поступательных вибраций, поведение поверхности раздела существенно изменяется: в зависимости от параметров жидкости и интенсивности вибраций наблюдается уменьшение скорости роста пальцев и полное подавление развития неустойчивости (см. рис. 1).

Изучено влияние периодического воздействия на скорость роста пальцеобразных возмущений фронта в области параметров ниже границы устойчивости. Определены параметры вибраций, при которых фронт вытеснения устойчив, т. е. возмущения формы фронта затухают, и он принимает форму плоской поверхности, перпендикулярной оси вибраций. Полученные результаты позволяют оценить параметры вибрационного воздействия, необходимого для интенсификации фильтрации в пористых средах.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.3.

Литература

1. Бублик СА, Семин МА. Исследование неустойчивости Саффмана–Тейлора в нефтесодержащем пласте в двумерной постановке задачи // Математическое моделирование. 2020. Т. 32(7). С. 127-42.
2. Jangir P., Mohan R., Chokshi P. Experimental study on the role of polymer addition in Saffman–Taylor instability in miscible flow displacement // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34. 093102.
3. Логвинов О.А. Об устойчивости боковой поверхности вязких пальцев, образующихся при вытеснении жидкости из ячейки Хеле-Шоу // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2011. Т. 2. С. 40-46.
4. Матвеев ВН, Кирсанов ЕА. Вязкость и структура дисперсных систем // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2011. Т. 52(4). С. 243-276.
5. Lyubimova T, Ivantsov A, Lyubimov D. Control of fingering instability by vibrations // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. 2021. Vol. 16. P. 40.
6. Papanastasiou T.C. Flows of Materials with Yield // Journal of Rheology. 1987. Vol. 31, №. 5. P. 385-404.
7. Herschel W. H., Bulkley R. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen, , Kolloid-Zeitschrift. 1926. Vol. 39. P. 291-300.

ВЫНУЖДЕННЫЕ ТРАНСЛЯЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КАПЛИ С УЧЕТОМ ГИСТЕРЕЗИСА КРАЕВОГО УГЛА

Алабужев А.А.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Рассматриваются вынужденные колебания капли жидкости, зажатой между параллельными однородными поверхностями и окруженная несжимаемой жидкостью другой плотности, в поле продольных вибраций. Равновесный краевой угол между боковой поверхностью капли и твердой пластиной предполагается прямым. Движение контактной линии учитывается с помощью эффективного граничного условия [1-5]: скорость движения контактной линии прямо пропорциональна углу отклонения θ и движение контактной линии возможно, если значение краевого угла превышает некоторое критическое значение θ_c :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \Lambda \begin{cases} (\gamma - \gamma_c), & \gamma > \gamma_c, \\ 0, & |\gamma| < \gamma_c, \gamma = \text{tg}(\theta) \cos(\alpha), \\ (\gamma + \gamma_c), & \gamma < -\gamma_c, \end{cases} \quad (1)$$

где ζ – отклонение линии контакта от положения равновесия, Λ — интегральный параметр (параметр Хокинга или параметр смачивания или капиллярный параметр), описывающий взаимодействие контактной линии с твердой подложкой. Другими словами, контактная линия будет стационарной, если абсолютное значение отклонения угла контакта γ меньше определенного характерного значения γ_c . Экспериментально подтвержденной причиной гистерезиса угла контакта является шероховатость поверхности твердого тела, но только при покрытии очень гладких поверхностей этого можно было добиться без гистерезисного случая [6].

На систему действует внешняя высокочастотная вибрационная сила, направление вибраций параллельно твердым пластинами, между которыми зажата капля. Амплитуда вибрации мала по сравнению с характерными размерами капли.

Задача решалась в малоамплитудном приближении. Значения частоты вибраций были ограничены приближением несжимаемой невязкой жидкости. Уравнение (1) определяет диссипацию энергии при движении линии контакта и ее взаимодействия с подложкой [1-5]. Решение находилось в виде рядов Фурье по собственным функциям оператора Лапласа в цилиндрической системе координат. Система нелинейных дифференциальных уравнений для амплитуд количеством $N = 400$ решалась численно.

Полученная система является диссипативной (за исключением предельных случаев), так что любое начальное состояние будет приближаться к некоторому устойчивому колебательному состоянию после определенного переходного процесса, т.е. любая фазовая траектория оказывается на предельном цикле. Ранее было показано, что для случая без гистерезиса скорость затухания сравнима с частотой колебаний, а время затухания равно нескольким периодам колебаний. Чтобы убедиться в существовании стационарного состояния, анализировались спектры Фурье.

Отметим, что частоты собственных колебаний монотонно убывают с ростом Λ (Рис. 1а), при этом основная частота обращается в нуль при некотором значении параметра Λ . То есть, такие "изгибные" колебания существуют только для достаточно

малых Λ и обусловлены сильным взаимодействием капли с подложкой. В случае фиксированного краевого угла капля свободно скользит по подложке и колебания, сопровождающиеся движением центра масс капли, невозможны. При более высоких значениях Λ возвращающая сила, действующая на каплю со стороны подложки, недостаточна для возникновения колебательного движения. В этом случае наблюдается затухающее поступательное движение капли по инерции. Декременты затухания имеют максимумы при конечных значениях Λ , стремясь к нулю в предельных случаях свободной и фиксированной контактной линии (Рис. 1б).

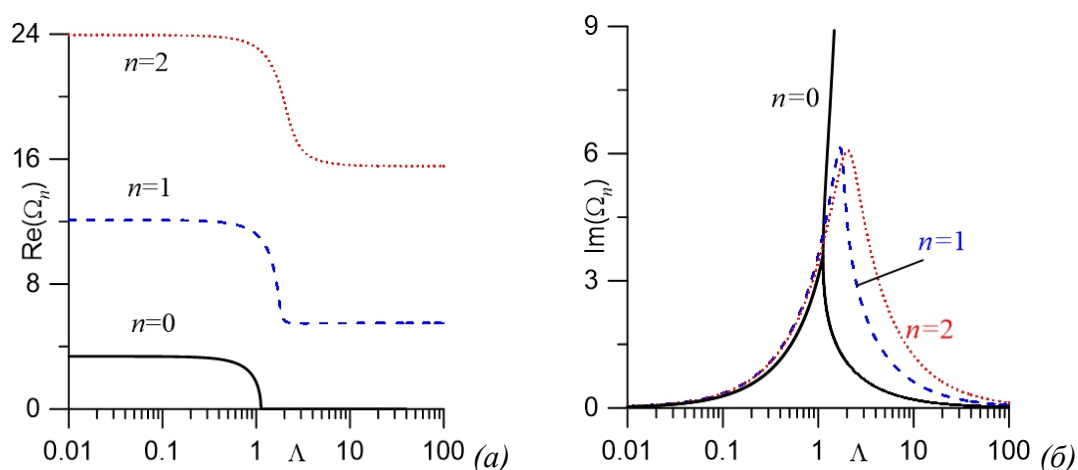


Рис. 1. - Зависимость частоты (а) и декремента затухания (б) от параметра Хоккинга

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.4

Литература

1. Hocking L.M. The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary // J. Fluid Mech. 1987. Vol. 179. P. 253-266. <https://doi.org/10.1017/S0022112087001514>
2. Fayzrakhmanova I., Straube A. Stick-slip dynamics of an oscillated sessile drop // Phys. Fluids. 2009. Vol. 21, 072104. <https://doi.org/10.1063/1.3174446>
3. Fayzrakhmanova I.S., Straube A. V., Shklyaev S. Bubble dynamics atop an oscillating substrate: Interplay of compressibility and contact angle hysteresis // Phys. Fluids. 2011. Vol. 23, 102105. <https://doi.org/10.1063/1.3650280>
4. Alabuzhev A.A. The influence of contact angle hysteresis on forced vibrations of a clamped drop // Phys. Fluids. 2024. Vol. 36, 092011. <https://doi.org/10.1063/5.0226273>
5. Alabuzhev A.A. Forced oscillations of gas bubble with hysteresis of contact angle // Phys. Fluid. 2025. Vol. 37, 022124. <https://doi.org/10.1063/5.0248245>
6. Dussan V.E.B. On the Spreading of liquids on solid surfaces: static and dynamic contact lines // Ann. Rev. Fluid Mech. 1979. Vol. 11 P. 371-400. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.11.010179.002103>

ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЗАБОРА ВОДЫ ИЗ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ

Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Пространственные изменения плотности воды являются ключевым фактором, определяющим гидродинамические и экологические процессы в водоемах. Плотность водных масс формируется под влиянием четырех основных параметров: температуры, степени минерализации, концентрации взвешенных частиц и гидростатического давления. Роль давления становится заметной лишь на значительных глубинах, поэтому для большинства внутренних водоемов с глубинами до 20 метров этим фактором пренебрегают. Он учитывается лишь при изучении таких глубоких озер, как Байкал. Взвешенные наносы, в свою очередь, создают непостоянный, кратковременный эффект из-за своей подвижности. Таким образом, в континентальных водоемах основными факторами, влияющими на плотность являются температура и минерализация воды [1,2].

Поскольку природа этих двух факторов различна, в прикладных исследованиях часто выделяют доминирующий. Тем не менее, для водоемов, испытывающих сильное техногенное воздействие, необходимо учитывать оба фактора. Такой подход позволяет обнаруживать новые явления и по-новому интерпретировать уже известные процессы.

Решение этой задачи осложняется нелинейной зависимостью плотности от температуры. Дело в том, что пресная вода имеет максимальную плотность при 4°C, а с ростом минерализации эта температура меняется. Совместное влияние температуры и солености значительно увеличивает количество возможных сценариев формирования плотности. Эти факторы могут как усиливать, так и компенсировать друг друга, что приводит к большому разнообразию вертикальных распределений параметров по глубине. Наглядно продемонстрировать это влияние позволяет сравнение двух различных водных объектов: Камского водохранилища (в районе Соликамско-Березниковского промузла) и Верхне-Зырянского водохранилища, используемого для технического водоснабжения предприятий. Качество воды в Камском водохранилище в основном формируется под влиянием природных условий. Минерализация здесь редко превышает 1 г/л, а температура варьируется от 0 до 26°C. В формировании же гидрохимического режима Верхне-Зырянского водохранилища косвенно участвуют техногенные факторы. Если температурный диапазон в обоих случаях схож, то соленость в придонных слоях Верхне-Зырянского водохранилища может достигать 10 г/л. В условиях низкой скорости течения в этих водоемах ($V \leq 0,05$ м/с), даже незначительные градиенты плотности способствуют формированию устойчивых стратифицированных структур. Эти структуры оказывают решающее влияние на процессы формирования качества воды и определяют стабильность всей системы водопользования.

В рамках выполнения работ по второму этапу реализации проекта получена целостная картина изменения удельной электропроводности в исследуемых створах Верхне - Зырянского водохранилища и выявлены слои с повышенной минерализацией воды. Найдено, что наиболее сильно вертикальная стратификация выражена в зимний период, что связано с увеличением доли питания водного объекта подземными водами.

Проведено численное моделирование работы водохранилища, характеризующегося наличием в придонных слоях зон повышенной по сравнению с поверхностным слоем минерализацией. Данная вертикальная стратификация отмечается как в период летней межени, так и в период зимней межени. Определены режимы промывки водохранилища на

основе изменения системы водосброса. Эффективной является радикальная промывка всего водохранилища путем организации селективного водосброса, обеспечивающей забор минерализованной воды из придонной области. На рисунке 1 показаны поля температуры и минерализации воды на расчетном участке Верхне-Зырянского водохранилища в летний период. Неоднородность температуры (Рис. 1а) способствует устойчивости слоя скачка. Более минерализованная вода расположена у придонных горизонтов (Рис.1б).

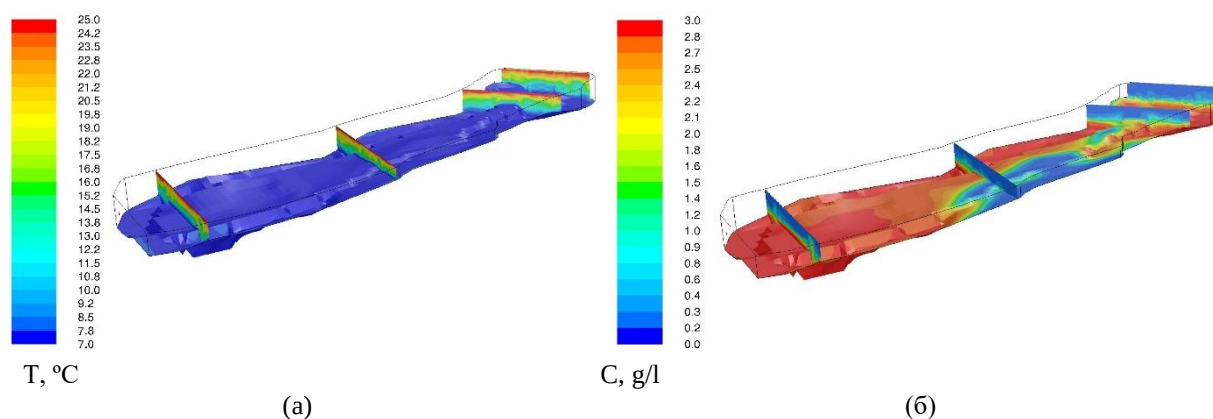


Рис. 1. - Распределения температуры (а) и минерализации (б) в Верхне - Зырянском водохранилище на дне и в вертикальных сечениях.

На крупных водоемах, находящихся в регионах с интенсивной техногенной нагрузкой, где высока вероятность образования слоистых водных структур, ключевой задачей становится внедрение систем автоматического мониторинга. При этом приоритет должен отдаваться не только автоматизированному измерению гидрохимических показателей, но и непрерывному контролю уровня воды. Это обусловлено спецификой одного из важнейших гидрологических параметров — уклона водной поверхности. В отличие от большинства точечных измерений, уклон является пространственной характеристикой, определяемой разностью уровней на определенном отрезке русла (L). В зонах выклинивания подпертых водных масс уклон поверхности крайне мал, составляя порядка $10^{-5} - 10^{-6}$. Для регистрации столь незначительных перепадов (эквивалентных 1-10 мм на километр) необходимы измерения на значительных по протяженности участках реки или водоема.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.5.

Литература

1. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Kononov V., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // J. Hydrol, 2014. V. 508. P. 328-342. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.041>
2. Лепихин А.П., Богомолов А.В., Тиунов А.А. Особенности течений в верхних бьефах крупных ГЭС, связанных с неравномерностью пропуска через них воды // Горное эхо, 2020. № 1 (78). С. 12-15.

КОНВЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ ЧЕРЕЗ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ СЛОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ЗАКУПОРКИ

Марышев Б.С., Клименко Л.С.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Транспортные процессы в пористой среде сопровождаются взаимодействием примеси с твердой матрицей среды, что замедляет процессы транспорта. Предложена новая модель описания подобного процесса в рамках известного МІМ (mobile/immobile media) подхода [1]. Для значительных концентраций примеси необходимо использовать нелинейный вариант МІМ модели учитывающей насыщение твердой матрицы пористой среды осевшей примесью. Заметим, что описываемый транспортный процесс имеет обратное влияние на фильтрационный поток флюида через пористую среду. Само наличие неподвижной фазы сокращает объем пор, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления среды или падению проницаемости, этот эффект описывается с помощью соотношения Козени-Кармана [2]. Фильтрация описывается с помощью стандартной модели Дарси-Буссинеска [3].

Решена задача об устойчивости модулированного во времени однородного течения через горизонтальный слой пористой среды. Рассматривается линейная устойчивость по отношению к двумерным возмущениям. Границы слоя считаются непроницаемыми, между ними задается постоянный перепад концентрации примеси. Путем специального выбора системы отсчета для давления удалось свести влияние модуляции потока к модуляции числа Пекле. Математически, в рамках предложенной модели [4], задача может быть записана в следующей безразмерной форме:

$$(1-\zeta Q)\frac{\partial C}{\partial t} + \zeta\left(\frac{1}{C_0} - C\right)\frac{\partial Q}{\partial t} = -\vec{U} \cdot \nabla C + (1-\zeta Q)\nabla^2 C - \zeta \nabla Q \cdot \nabla C,$$

$$\vec{U} = -\kappa(Pe\nabla p - \vec{j}RpC), \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = a(1-Q)C - bQ,$$

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0, \quad \kappa = \phi^3 / (1+\phi)^2, \quad \phi = \phi_0(1-\zeta Q),$$

$$\left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{y=0,1} = -1, \quad \vec{U} \cdot \vec{j}|_{y=0,1} = 0, \quad C|_{y=0} = 0, \quad C|_{y=1} = 1,$$

где вектор $\vec{j}$ – единичный вектор, направленный против поля тяжести, $\vec{U}$ – вектор скорости фильтрации, C, Q – объемные концентрации мобильной и немобильной компонент примеси, соответственно, p – отклонение давления от гидростатического распределения, κ, ϕ – проницаемость и пористость среды. Задача содержит семь безразмерных параметров: безразмерные коэффициенты адсорбции и десорбции $a = C_0 \alpha L^2 / D$, $b = \alpha K_d L^2 / D$, число Пекле $Pe = \Delta P \kappa_0 / (D \phi_0 \eta)$ – описывающее интенсивность напорной фильтрации, число Релея-Дарси $Rp = C_0 \rho \beta_c g \kappa_0 L / (\eta D \phi_0)$ – описывающее интенсивность течения возникающего из-за сил плавучести. Также присутствует параметр закупорки $\zeta = q_0 / \phi_0 \leq 1$ – описывающий максимальную долю

порового пространства, которая может быть занята немобильной примесью, пористость чистой среды ϕ_0 и перепад концентрации между границами слоя – C_0 .

Показано, что задача допускает решение в виде пульсационного горизонтального переноса примеси, когда все поля зависят только от вертикальной координаты: $U = (\kappa^0 Pe^*, 0)$, $C = C^0(y)$, $Q = Q^0(y)$:

$$\begin{aligned}\kappa^0 &= (\phi^0)^3 / (1 - \phi^0)^2, \phi^0 = \phi_0 (1 - \zeta Q^0), \\ C^0 &= b Q^0 / a (1 - Q^0), Q^0 = 1 - \exp(W[-B_2 e^{-\beta}] + \beta), \\ \beta &= B_1 y + B_2, B_2 = (1 - \zeta) / \zeta, B_1 = B_2 a / b - \ln(1 - a / b),\end{aligned}$$

где W – функция Ламберта. В случае, когда закупорка пористой среды значительна, равновесный профиль концентрации искривляется. Искривление тем значительнее, чем выше значения параметра закупорки. Характерный вид профиля мобильной концентрации представлен на Рис. 1.

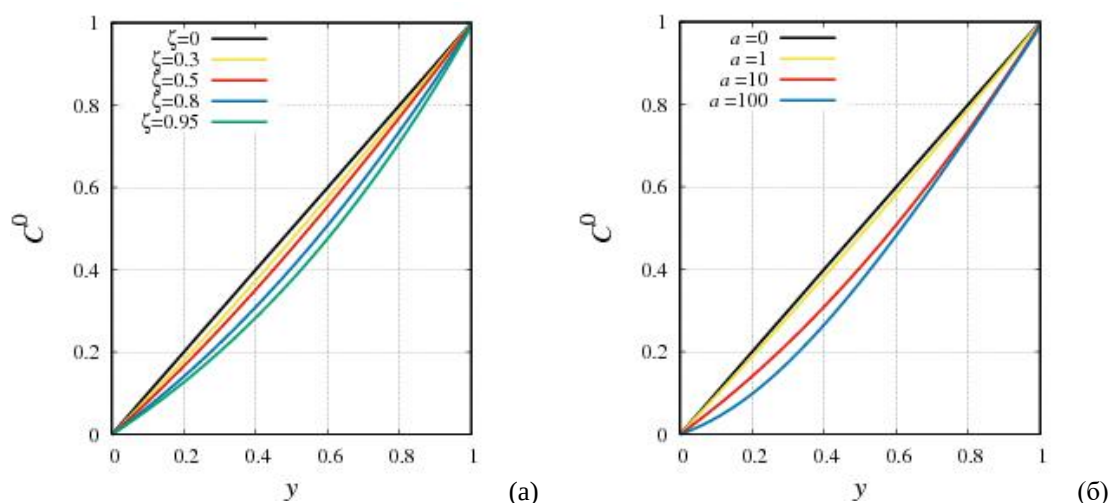


Рис. 1. – Распределение концентрации мобильной компоненты примеси вдоль вертикальной координаты при различных значениях параметра закупорки и значениях параметров сорбции $a=10, b=5$ (а); при различных значениях коэффициента адсорбции и $\zeta=0.8, b=5$ (б).

Исследована устойчивость полученного решения по отношению к двумерным возмущениям, показано что возможно наблюдение трех типов отклика. Синхронный – частота возмущения совпадает с частотой модуляции, субгармонический – частота возмущения в два раза меньше частоты модуляции, квазипериодическая – отношение частоты возмущения к частоте модуляции иррационально. Получены карты устойчивости в пространстве параметров задачи для всех трех типов возмущений. Зависимости критического значения числа Релея-Дарси и соответствующего ему значения волнового числа возмущений от пористости чистой среды представлены на на Рис. 2.

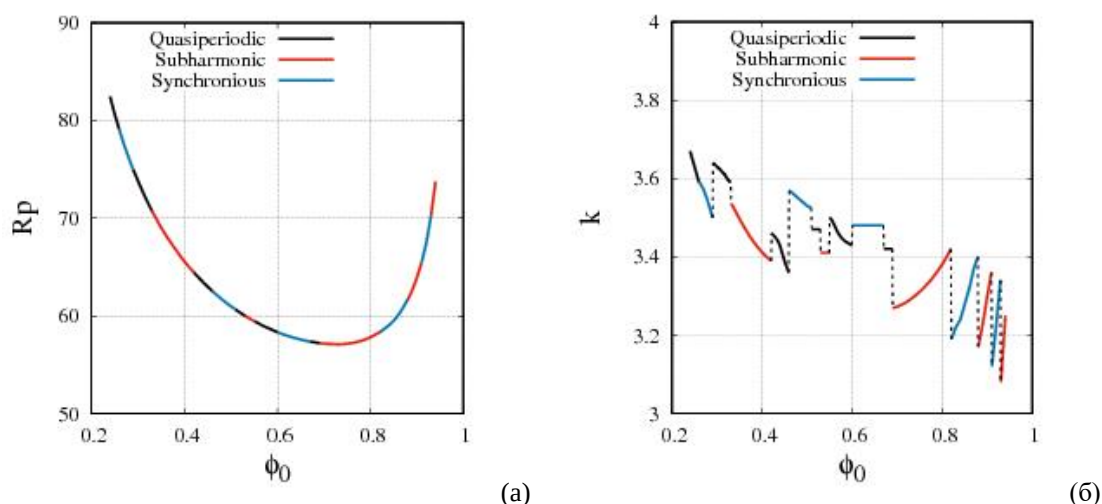


Рис. 2. – Зависимости критического значения числа Релея-Дарси (а) и соответствующего ему значения волнового числа возмущений (б) от пористости чистой среды. Для расчета были выбраны следующие значения остальных параметров: $Pe = 10, A = 5, \Omega = 12, a = 8, b = 8, C_0 = 0.5, \zeta = 0.8$.

Показано, что зависимости критического числа Релея-Дарси и критической амплитуды пульсаций от частоты имеют характерный вид «мешков», которые часто наблюдаются в случае параметрического возбуждения колебаний. Это объясняется тем, что в отсутствие пульсаций наблюдается колебательная неустойчивость режима однородной прокачки. Установленный характер неустойчивости пульсационного потока позволяет говорить о возможности эффективного управления устойчивостью одномерного решения путем контроля амплитуды и частоты пульсаций.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.6.

Литература

1. Selim H. M., Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multireaction models // Environ. Health Perspect. 1989. Vol. 83. P. 69-75. <https://doi.org/10.1289/ehp.898369>
2. Carman P. C. Fluid flow through granular beds //Trans. Inst. Chem. Eng. London. 1937. Vol. 15. P. 150-156.
3. Nield D.A., Bejan A., Convection in porous media. New York: Springer Science + Business Media, 2017. 998 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0>
4. Maryshev B. S., Klimenko L. S. Strong clogging effect on solutal convection of a net mass flow through a horizontal porous layer with impurity immobilization //J. Por. Media 2025. Vol. 28. P. 41-68. <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.2025055625>

КОНВЕКЦИЯ МАРАНГони В КАПЛЕ С ПУЗЫРЬКОМ ГАЗА, НАХОДЯЩЕЙСЯ В НЕОДНОРОДНОМ РАСТВОРЕ ПАВ

Денисова М.О., Костарев К.Г.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

В настоящее время капли являются одним из наиболее востребованных объектов исследований в гидродинамике. Объясняется это тем, что капли широко распространены в природе и технике. В частности, диспергирование одной из жидкостей можно отнести к излюбленным технологическим приемам с целью резкого увеличения интенсивности тепло/массообменных процессов в системе двух и более жидкостей с разной степенью взаимной растворимости. Одной из основных областей использования этого приема является жидкостная экстракция – извлечение желаемого компонента из его смеси путем избирательной диффузии через межфазную границу в контактирующую жидкость.

Несмотря на высокую эффективность, жидкостная экстракция не лишена недостатков, главным из которых является разность исходных плотностей жидкостей системы, из-за которой сформированные капли быстро покидают объем контактирующей жидкости. Нами для снижения перепада плотностей предлагается использовать введение газовых пузырьков в капли. Это позволит существенно продлить время контакта капли с окружающей средой и увеличить количество экстрагируемого компонента.

Для оценки перспективности системы «капля-газовый пузырек» экспериментально изучен массообмен между подобной каплей и окружающей средой. Исследование выполнено на примере капли, поглощающей ПАВ из его неоднородного раствора, устойчиво стратифицированного по концентрации. Наибольший интерес в этой задаче представляли структура течений и полей концентрации внутри капли и ее окрестности, а также их эволюция с течением времени. Сферическая форма капли, свободно плавающей в объеме жидкости, и само ее движение существенно ограничивают возможности применения оптических методов исследований, поэтому в эксперименте была использована неподвижная капля цилиндрической формы. Для достижения такого вида капля помещалась в плоский зазор с толщиной, меньшей, чем ее исходный диаметр. При этом свободной оставалась только боковая поверхность капли, а ее торцы оказывались параллельными друг другу, что позволило применить интерферометр Физо.

В качестве жидкости капли выбрана смесь бензола и хлорбензола. Окружающая среда – водный раствор ПАВ, в роли которого выступали (а) этиловый спирт либо (б) уксусная кислота. Спирт легче воды, кислота – тяжелее. Их выбор позволяет в процессе поглощения ПАВ организовать капиллярное движение вдоль ее межфазной поверхности как вниз (вариант а), так и вверх (вариант б), при этом пузырек газа в обоих случаях находится в верхней части капли. В ходе эксперимента были визуализированы течения и поля концентрации ПАВ, экстрагируемого из раствора, заполнявшего вертикальную ячейку Хеле-Шоу. Изучена их эволюция в зависимости от природы ПАВ, его градиента и средней концентрации на уровне капли, соотношения размеров капли и пузырька.

Эксперимент состоял из двух этапов, первый из которых был посвящен изучению поведения капли без пузырька в градиенте ПАВ, а второй – выяснению особенностей массообмена между каплей с пузырьком и окружающим раствором. В рамках первого этапа были подтверждены результаты ранее выполненных экспериментов [1]. Показано, что при превышении порогового перепада концентрации ПАВ процесс поглощения

последнего капель сопровождался установлением колебательного режима конвекции Марангони, представлявшего собой периодическое возникновение очень интенсивного капиллярного движения («вспышку») в виде пары вихрей вблизи одного из полюсов капли.

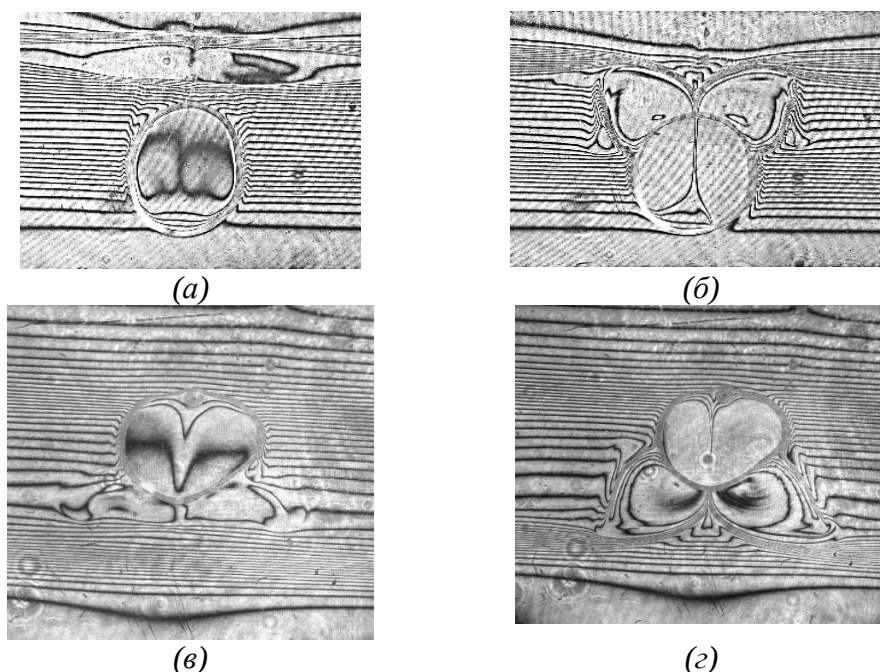


Рис. 1. – Вид распределения концентрации этилового спирта (а-б) и уксусной кислоты (в-г) в капле без пузырька и ее окрестности непосредственно перед очередной «вспышкой» конвекции Марангони (а, в) и в течении ее «вспышки» (б, г). Исходные концентрации спирта и кислоты $C_{01} = 4,2$ моль/л и $C_{02} = 3,17$ моль/л соответственно. Диаметр каплей составлял $D_{в01} = 9,6$ мм и $D_{в02} = 7,4$ мм. Время «вспышки» с момента установления колебательного режима $t_{01} = 2$ мин и $t_{02} = 26$ мин.

Оценить действующие градиенты концентрации ПАВ (см. рис. 1) можно, учтя, что переход от одной однотонной интерференционной полосы к другой соответствует изменению концентрации спирта на 0.063 моль/л, кислоты – на 0.075 моль/л.

Как следует из рис. 2, введение пузырька воздуха в каплю не приводит к значительному изменению характера массообмена. Сохраняется колебательный режим конвекции Марангони, при этом период осцилляций течения немного уменьшается, равно как и вариация самого периода от одного колебания к другому (рис.3-а). Причины этого следующие. Во-первых, поверхностное натяжение на свободной поверхности заметно выше межфазного натяжения на границе капли – в результате на поверхность пузырька натекает пленка бензола, имеющего в системе «капля смеси бензола с хлорбензолом – пузырек воздуха» наименьшее натяжение, т.е. пузырек оказывается внутри капли, несмотря на значительную разность плотностей. Более того, в случае раствора спирта во время интенсификации конвекции Марангони, капиллярное движение, будучи тангенциальным к поверхности пузырька, сокращает ее кривизну, «заталкивая» пузырек вглубь капли. Деформация пузырька работает как демпфер, поглощая часть кинетической энергии движения и приводя к сокращению периода «вспышки» Марангони. Во-вторых, из-за быстрого достижения равенства химических потенциалов – спирт и кислота в равновесии распределяются между бензолами и водой как 1 к 10 – внутри капли не могут появиться большие градиенты концентрации ПАВ, в результате чего пузырек не может существенно участвовать в формировании течения внутри капли.

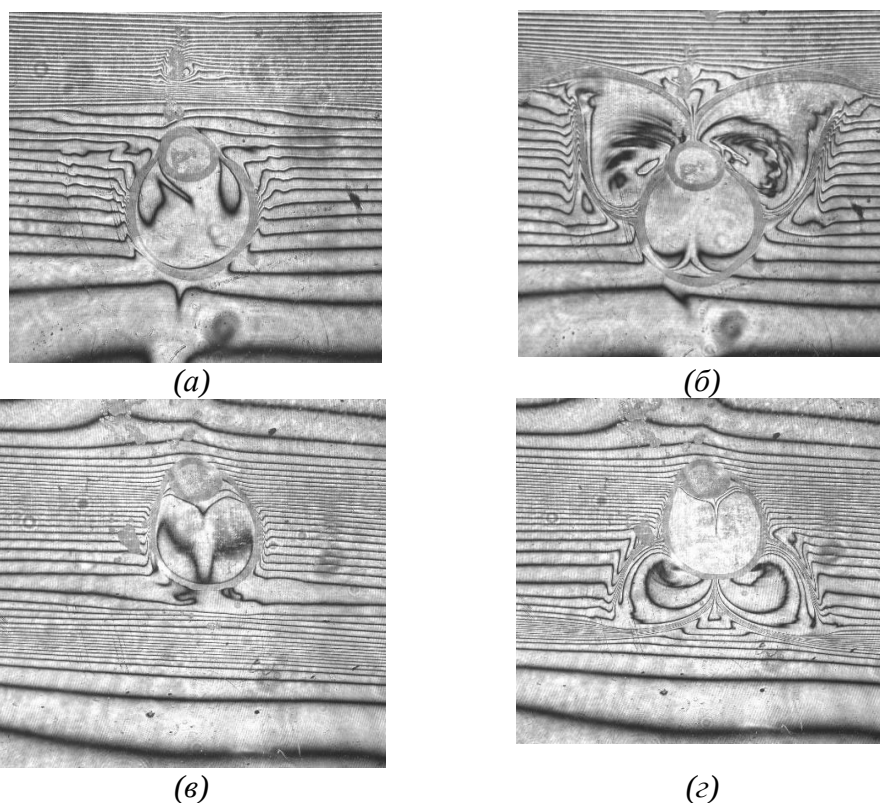


Рис. 2. – Вид распределения концентрации этилового спирта (а-б) и уксусной кислоты (в-г) в капле с пузырьком воздуха и ее окрестности непосредственно перед очередной «вспышкой» конвекции Марангони (а, в) и в течении ее «вспышки» (б, г). Исходные концентрации спирта и кислоты $C_{01} = 4,2$ моль/л и $C_{02} = 3,17$ моль/л соответственно. Диаметр каплей составлял $D_{в01} = 7$ мм и $D_{в02} = 8$ мм. Время «вспышки» с момента установления колебательного режима $t_{01} = 1$ мин и $t_{02} = 20$ мин.

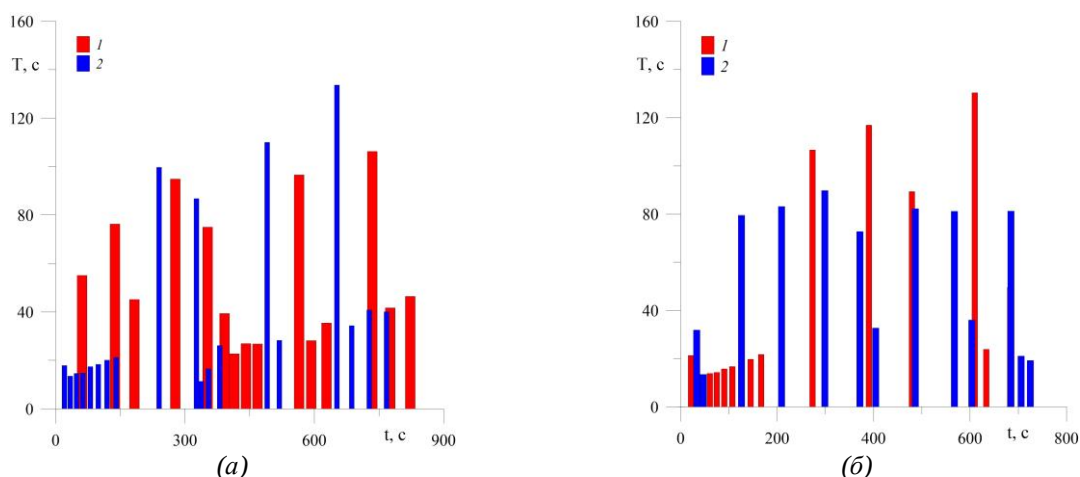


Рис. 3. – Сопоставление зависимости периодов колебательного режима от времени для капли без пузырька (1) и с пузырьком (2) в стратифицированных растворах этилового спирта (а) и уксусной кислоты (б).

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.7.

Литература

1. Денисова М.О., Зуев А.Л., Костарев К.Г. Колебательные режимы концентрационной конвекции // УФН. 2022. Т. 192, №8. С. 817–840. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039030>

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ АДсорбЦИИ-ДЕсорбЦИИ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРАЦИОННО- И ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТОВ

Шмыров А.В., Мизев А.И., Брацун Д.А., Сираев Р.Р.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ФИЦ УрО РАН

Экспериментальные и теоретические исследования [1-4] показывают, что на межфазной поверхности жидкость-воздух, загрязненной нерастворимым поверхностно-активным веществом (ПАВ), при наличии продольного градиента температуры, механизмы термокапиллярной и концентрационно-капиллярной конвекции могут конкурировать между собой. В итоге возможны ситуации, когда реализуется только термокапиллярная конвекция, либо в результате уравнивания обоих механизмов поверхность оказывается обездвиженной. Есть также третий вариант, когда на части поверхности действует термокапиллярная конвекция, а в другой части образуется застойная зона. В [1,2] предлагаются аналитические и численные решения для определения положения границы застойной зоны, которые полностью согласуются с экспериментальными данными.

Для растворимых ПАВ картина оказывается более сложной вследствие вовлечения в массообмен помимо термокапиллярной и концентрационно-капиллярной конвекции дополнительных механизмов: молекулярной и поверхностной диффузии, процессов адсорбции-десорбции. Под молекулярной диффузией понимается перенос вещества между объемом раствора и приповерхностным слоем вблизи межфазной границы. Поверхностная диффузия включает перемещение молекул ПАВ по границе раздела фаз. Процессы адсорбции-десорбции зависят от кинетики ПАВ, растворенных в несущей жидкости. Разнообразие механизмов массообмена, а также кинетических свойств ПАВ, приводят к тому, что динамические свойства переноса вблизи межфазной границы в слое растворимых ПАВ пока ещё изучены недостаточно. В настоящей работе предлагается математическая и численная модели совместной термокапиллярной и концентрационно-капиллярной конвекции растворимого ПАВ, результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными.

Теоретическая постановка задачи формулировалась таким образом, чтобы быть максимально близкой к условиям физического эксперимента: вычисления выполнялись при тех же условиях, для тех же жидкостей, которые участвуют в эксперименте. Геометрия задачи представляла собой вертикальную ячейку Хеле-Шоу между двумя стеклянными пластинами с зазором 0.25 см. Ширина и высота ячейки 1.6 см на 0.8 см, соответственно. Верхняя часть открыта и граничит с массивом воздуха. Ячейка заполнена водным раствором гексанола, представляющего собой растворимый ПАВ. Начальная концентрация раствора мала $c_0 = 0.5$ моль/м³, поэтому можно считать, что физические свойства жидкого раствора близки к свойствам воды. Кинетические свойства молекул гексанола описаны в литературе [4].

Для лучшего соответствия численной модели эксперименту необходимо учитывать сопровождающие его физические процессы. К их числу нужно отнести то, что экспериментальное распределение температуры вдоль верхней границы ячейки было обусловлено поглощением неоднородного светового потока, который создавался с помощью лампы и оптической системы. Согласно закону Бугера-Ламберта-Бера

интенсивность света, распространяющегося в поглощающей среде, спадает по закону $I = I_0 \cdot \exp(-kz)$, где k – показатель поглощения. При этом интенсивность света изменяется по линейному закону вдоль поверхности жидкости. Точность решения тепловой подзадачи определяет важный для сравнения с экспериментом темп роста температуры в кювете. Поэтому окружающий кювету массив из стеклянных пластин и часть воздушной среды также были включены в постановку задачи. Последнее позволяет учесть теплоотдачу от экспериментальной установки в окружающую среду.

Разработано два варианта математической и численной модели: квази-двумерная модель на основе приближения Хеле-Шоу и полностью трехмерная модель. Соответствующие геометрии приведены на Рис.1.

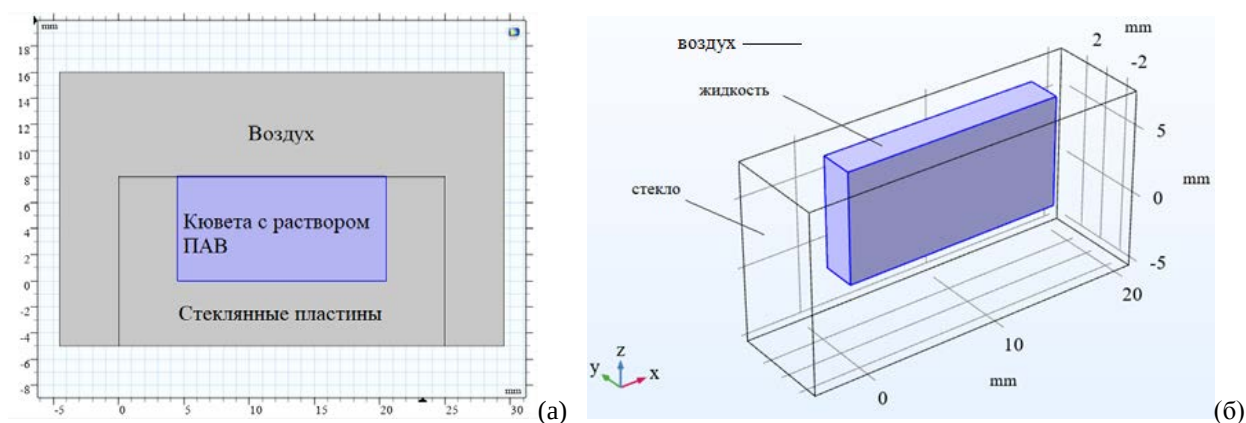


Рис. 1. – Геометрия задачи в случае квази-двумерной (а) и полностью трёхмерной постановки (б)

Разработанная математическая модель процессов переноса в кювете предполагала одновременное участие гравитационной тепловой конвекции, а также двух капиллярных механизмов тепловой и концентрационной конвекции. Поток ПАВ из объема на поверхность и обратно рассчитывались на основе кинетической изотермы Лангмюра $R = k_a c (1 - \Gamma / \Gamma_m) - k_d \Gamma$, где k_a , k_d – коэффициенты адсорбции и десорбции, Γ – поверхностная концентрация ПАВ, Γ_m – максимальное значение поверхностной концентрации, плотность монослоя. В воздушной среде также проводился расчет тепловой конвекции. В целом для всей геометрии решалось уравнение переноса тепла с учетом внутреннего тепловыделения, связанного с поглощением света от лампы в растворе ПАВ и массиве стекла. Концентрация ПАВ на поверхности вычислялась как

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + u_x \frac{\partial \Gamma}{\partial x} = D_s \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x^2} + R \quad (1)$$

где D_s – коэффициент поверхностной диффузии (формула приведена для постановки задачи в рамках приближения Хеле-Шоу).

Для решения задачи использовался пакет *Comsol Multiphysics*. При решении задач пакет производит автоматическую дискретизацию уравнений в частных производных, описывающих исходную математическую задачу. Вычисления производились на основе неявного решателя BDF, который использует формулы обратного дифференцирования. Расчетная область разбивалась сеткой со сгущением вблизи границ на основе алгоритма *Physics_Controlled_Mesh*. Было выполнено исследование независимости решения с последовательно уточненным разрешением сетки. Вычисления, проведенные для четырех

алгоритмов построения сетки: *Coarser*, *Coarse*, *Normal*, *Fine*, показали, что контролируемые интегральные величины асимптотически сходятся с уменьшением ячеек.

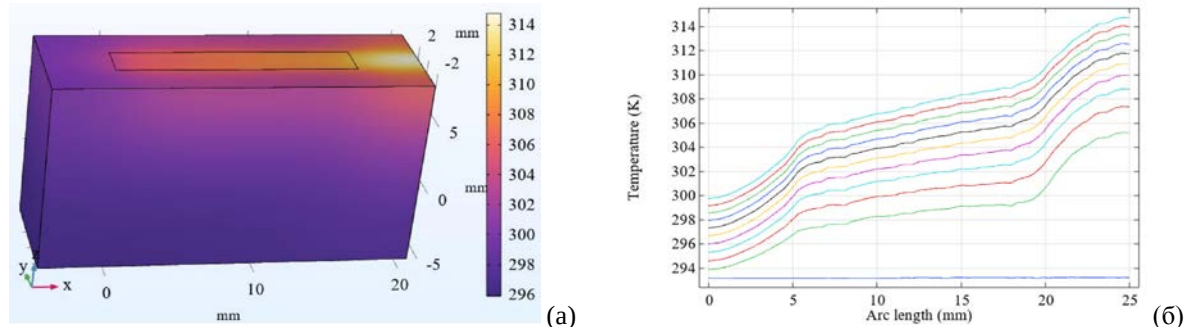


Рис. 2. – (а) Распределение температур в трёхмерной юкете и прилегающих участках твердых стенок и воздуха при одновременном учёте всех видов конвективного переноса в момент $t = 100$ с; (б) Зависимость температуры на межфазной поверхности жидкость-воздух и примыкающих участках твёрдого массива для разных моментов времени.

Предварительные численные эксперименты были проведены в области параметров, где монослой ПАВ на межфазной поверхности не формируется, а рост концентрации молекул ПАВ в правой части юкеты балансируется процессами десорбции. Рисунок 2 показывает, что в рамках модели удалось добиться получения распределения температур в установке и примыкающей сверху воздушной массе, которые близки реальным распределениям температуры в эксперименте. Как видно из рисунка, профиль температуры на поверхности близок к линейному (Рис. 2б).

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.7

Литература

1. Shmyrov A., Mizev A., Demin V., Petukhov M., Bratsun D. On the extent of surface stagnation produced jointly by insoluble surfactant and thermo-capillary flow // Adv. Colloid and Interface Sci. 2018. Vol. 255. P. 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.08.010>
2. Shmyrov A.V., Mizev A.I., Demin V.A., Petukhov M.I., Bratsun D.A. Phase transitions on partially contaminated surface under the influence of thermocapillary flow // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 877. P. 495-533. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.613>.
3. Homsy G. M., Meiburg E. The effect of surface contamination on thermocapillary flow in a two-dimensional slot // J. Fluid Mech. 1984. Vol. 139. P. 443-459. <https://doi.org/10.1017/S0022112084000446>
4. Carpenter B., Homsy G. M.. The effect of surface contamination on thermocapillary flow in a two-dimensional slot. Part 2. Partially contaminated interfaces // J. Fluid Mech. 1986.Vol. 155. P. 429-439. <https://doi.org/10.1017/S0022112085001884>
5. Chang C.H., Franses E.I. Adsorption dynamics of surfactants at the air/water interface: a critical review of mathematical models, data, and mechanisms // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 1995. V. 100. P.1-45. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(94\)03061-4](https://doi.org/10.1016/0927-7757(94)03061-4)

УСТОЙЧИВОСТЬ СЛОЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЯЗКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СО СТОРОНЫ ОБЪЕМНОГО ТЕЧЕНИЯ

Брацун Д.А., Уточкин В.Ю., Шмыров А.В., Мизёв А.И.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Исследуется устойчивость пленки нерастворимого поверхностно-активного вещества, расположенного на границе раздела жидкость – газ в условиях стационарного течения жидкости в объеме. В таких условиях движение пленки ПАВ развивается в двух измерениях, что может приводить к возникновению поверхностной циркуляции и периодической вихревой структуры, наблюдавшейся ранее во многих экспериментах, но не имевшей корректного объяснения [1, 2].

В ряде недавних экспериментов, проведенных в осесимметричной геометрии с различными генераторами радиального движения, было показано, что достижение критической мощности источника сопровождается развитием двумерной конвекции на поверхности жидкости со слоем нерастворимого ПАВ [3]. Было отмечено, что поверхностное течение обладает двухзонной структурой, включающей осесимметричную дивергентную область вблизи источника и азимутально-периодическое многовихревое течение в периферийной зоне. Разделение поверхности на две характерные области объясняется сжатием слоя ПАВ в условиях, когда касательные напряжения со стороны источника превышают поверхностное давление в слое. В результате слой переносится к периферии кюветы, формируя кольцевую застойную зону с фиксированной шириной, зависящей от реологических свойств ПАВ. В работе [3] также был предложен физический механизм поверхностной неустойчивости, в соответствии с которым застойная зона, будучи неподвижной в равновесном состоянии, играет роль твердой стенки для течения в объеме.

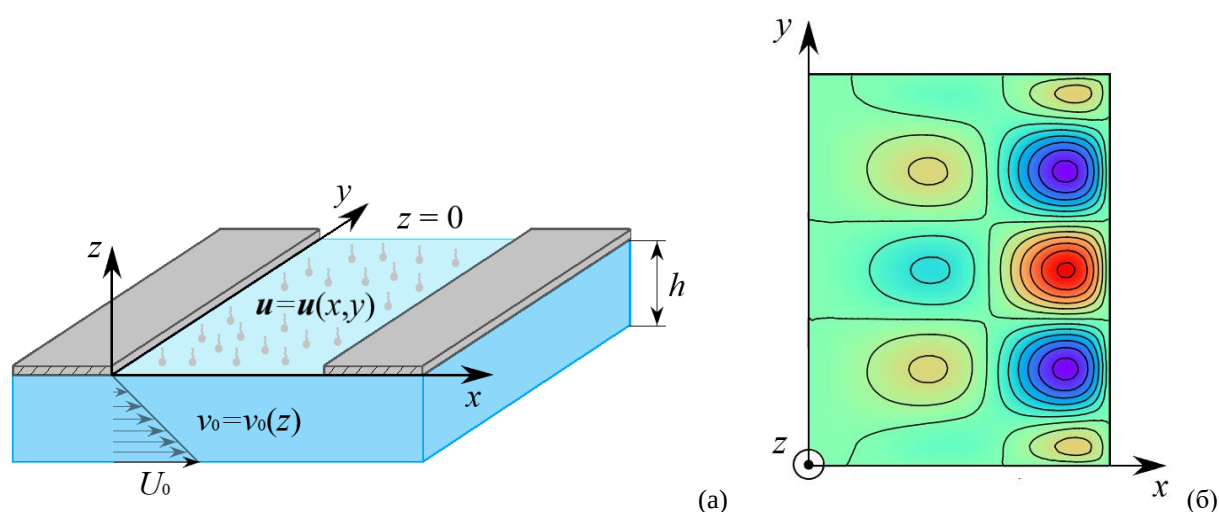


Рис. 1. – Схематическое изображение области течения в координатах (x, y, z) (а); распределение функции тока на поверхности ($z = 0$), занятой слоем ПАВ и приведенной в движение вязкими касательными напряжениями, действующими со стороны течения в объеме (б)

Кризис равновесия происходит при достижении вязкими напряжениями со стороны объемной фазы критического значения. Последние определяются скоростью движения в объеме и реологическими свойствами жидкости в объеме и на поверхности.

В настоящем исследовании развивается теоретическая модель движения слоя ПАВ, расположенного над областью стационарного объемного течения. Для описания движения в застойной зоне предлагается использовать модель Буссинеска-Скривена [4]:

$$P \cdot \text{Re} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla \Pi + \nabla^2 \mathbf{u} - Bq^{-1} \frac{\partial \mathbf{v}_{\parallel}}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (1)$$

где $\mathbf{u}(x, y)$ – двумерное поле скорости на поверхности $z = 0$, Π – поверхностное давление. Числа Прандтля P и Буссинеска Bq представляют отношения кинематических и динамических вязкостей поверхностной и объемной фаз, являясь фиксированными свойствами вещества. Динамика системы зависит только от числа Рейнольдса Re , являющегося управляющим параметром задачи. В модели (1) игнорируется переходный режим, связанный с формированием застойной зоны, поэтому слой изначально считается несжимаемым. Поверхностная концентрация предполагается постоянной вдоль застойной зоны, что обусловлено взаимной компенсацией теплового и концентрационного эффектов Марангони, а также нерастворимостью используемых ПАВ [3]. Поскольку механизм неустойчивости не зависит от геометрии кюветы, кольцевую застойную зону можно заменить прямоугольной и ограничить поверхностное течение твердыми стенками с обеих сторон (рис. 1, а). В основном состоянии поверхность жидкости считается неподвижной, а течение в объеме имеет невозмущенный линейный профиль скорости. В этом случае равновесное поверхностное давление оказывается линейной функцией горизонтальной координаты. Для определения порога неустойчивости формулируется линейная задача о поведении малых возмущений равновесного состояния. Возмущения поверхности учитываются в объемном течении при усреднении профиля скорости поперек слоя. В результате оказывается, что касательные напряжения зависят от скорости движения как в объеме, так и на поверхности, причем вклад последней оказывается демпфирующим. Показано, что под действием вязких напряжений на поверхности может развиваться неустойчивость в виде периодической последовательности вихревых структур. Определено критическое значение числа Рейнольдса Re , при котором возмущения в слое начинают возрастать, приводя его в движение. Решение задачи о конечных возмущениях показало, что с ростом Re возрастает и волновое число конвективной структуры.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.7.

Литература

1. Linde H., Shulewa N. Eine neue hydrodynamische Instabilität an einer mit einem Tensidfilm bedeckten Wasseroberfläche bei Stromungen zur Oberflächenenerneuerung // Monatsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. — 1970. — Т. 12, № 11/12. — С. 883—894.
2. Pshenichnikov A., Yatsenko S. Convective diffusion from a concentrated source of surfactant // Proceedings of Perm State University. Fluid Dynamics. Issue 5. No. 316. — 1974. — С. 175.
3. Mizev A., Shmyrov A., Shmyrova A. On the shear-driven surfactant layer instability // Journal of Fluid Mechanics. — 2022. — Т. 939. — С. 495—533.
4. Scriven L. Dynamics of a fluid interface equation of motion for Newtonian surface fluids // Chemical Engineering Science. — 1960. — Т. 12, № 2. — С. 98—108.

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ФОРСИНГА И ТИПА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА КРУПНОМАСШТАБНУЮ КОНВЕКТИВНУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ

Сухановский А.Н., Васильев А.Ю.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Турбулентная конвекция Рэлея-Бенара - это простейшая парадигма для проверки различных гипотез и выявления основных механизмов, ответственных за формирование и эволюцию тепловой конвекции в различных природных и технических системах. Турбулентная конвекция в замкнутых объемах характеризуется формированием крупномасштабной циркуляции (КМЦ) в результате пространственной организации мелкомасштабных тепловых потоков. Для областей с простой геометрией, таких как кубические полости, КМЦ можно рассматривать как суперпозицию нескольких основных мод течения. КМЦ обеспечивает конвективный теплоперенос, что определяет основное направление в исследованиях КМЦ, а именно интенсификацию теплопереноса. Важной особенностью КМЦ являются инверсии, то есть смена направления циркуляции. Подобные инверсии в технических системах обеспечивают заметные низкочастотные колебания температуры, приводящие к тепловым циклическим нагрузкам в промышленных системах и повреждению их конструктивных элементов. Все это подчеркивает важность изучения структуры и динамики КМЦ, и в особенности средств ее контроля и управления.

В данной работе исследовано влияние локализованного форсинга и типа граничных условий на средние и статистические характеристики КМЦ.

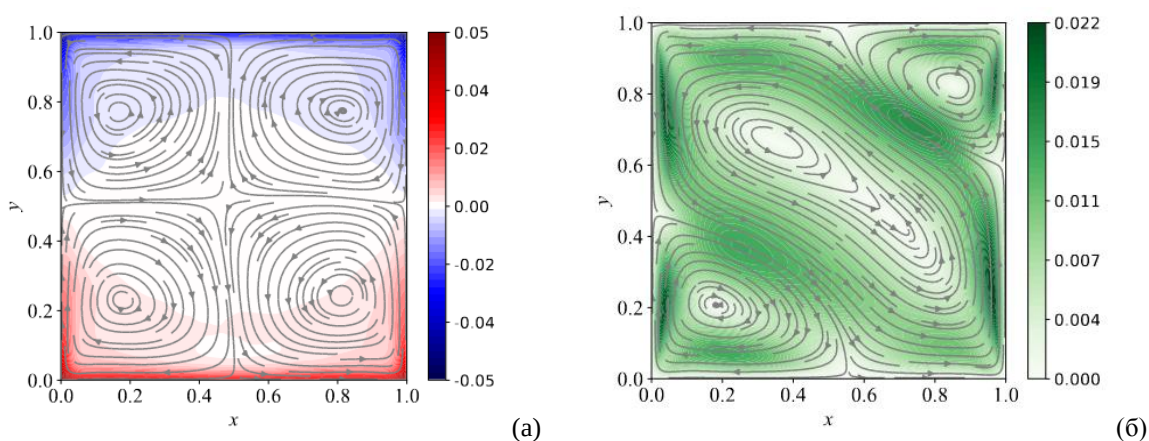


Рис. 1. Структура среднего течения и распределение температуры (цветом) без форсинга (а); структура среднего течения при малом форсинге (2% от полной мощности нагрева), цветом показаны абсолютные значения скорости в мм/с (б)

Для решения первой задачи исследована двумерная динамика КМЦ в случае граничных условий второго типа (постоянного теплового потока) с локализованным форсингом на вертикальной границе [1]. Особое внимание уделено роли периода форсинга, его расположения и интенсивности. Показано, что даже слабое воздействие, составляющее 1% от общей мощности нагрева, нарушает симметрию и приводит к

предпочтительному направлению циркуляции (против часовой стрелки) и появлению несимметричного среднего потока. Это особенно важно для экспериментальных исследований, поскольку они всегда характеризуются некоторыми отклонениями от идеальных условий. При фиксированной интенсивности воздействия изменение периода или расположения воздействия не приводит к существенным изменениям среднего течения или распределения пульсаций. Однако изменения расположения форсинга влияют на количественные характеристики КМЦ.

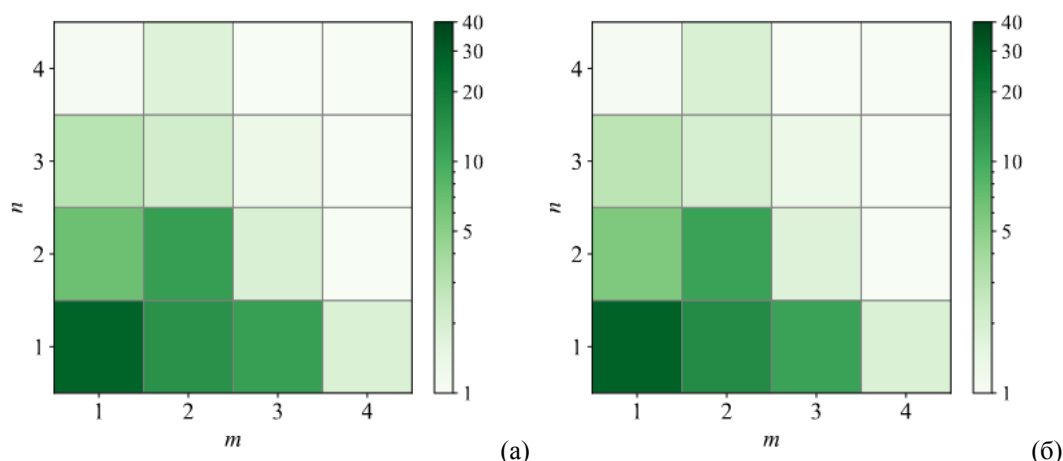


Рис. 2. Средняя энергия основных мод Фурье (нормированная на значение средней кинетической энергии КМЦ). (а) - постоянная температура, (б) - постоянный тепловой поток.

В рамках второй задачи изучена чувствительность динамики КМЦ в квадратной ячейке к типу граничных условий. Были рассмотрены два типа граничных условий на горизонтальных границах: постоянная температура и постоянный тепловой поток. Было обнаружено, что в отличие от конвекции Рэлея-Бенара в горизонтально протяженных слоях, структура и динамика КМЦ в квадратной ячейке не зависят от типа граничных условий. Различия в статистических свойствах КМЦ, таких как количество инверсий и остановок, а также функции плотности вероятности, незначительны для различных граничных условий. Совокупное среднее значение основных характеристик, включая число Нуссельта и амплитуду доминирующего режима, поддерживает сценарий, основанный на накоплении потенциальной энергии, ее сброса и результирующем ускорении КМЦ. Низкая чувствительность динамики крупномасштабной циркуляции к типу граничных условий указывает на то, что она в первую очередь определяется количеством тепла, подаваемого в систему, а не пространственным распределением тепловых потоков.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.11.8.

Литература

1. Sukhanovskii A., Vasiliev A. Influence of local time-periodic heat forcing on the large-scale convective circulation in a square Rayleigh-Benard cell // Europhysics Letters (2025), accepted. DOI 10.1209/0295-5075/ae065d

Направления исследований и номера задач из плана-графика работ

Механика новых материалов и конструкций

- 2.2.1. Проведение численных исследований с целью валидации базовых принципов формирования высоконагруженных интеллектуальных пробионических конструкций на примере гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин.
- 2.2.2. Разработка общей схемы демонстратора комплексной встроенной системы мониторинга технического состояния и создание отдельных его частей для агрегатов/отсеков/фрагментов гипотетической интеллектуальной пробионической конструкции.
- 2.2.3. Экспериментальное и численное исследование эффективности положительной синергетики от взаимодействия встроенной системы мониторинга с элементами силовой конструкции.
- 2.2.4. Разработка образцов фрагментов конструкции, конструктивно-подобных образцов, элементарных образцов для гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин.
- 2.2.5. Проведение комплексных экспериментально-теоретических исследований, направленных на оценку положительной синергетики от использования ресурсосберегающих (эко) способов изготовления.
- 2.3.1. Комплексное экспериментальное исследование деформирования композитных пластин и оболочек при статических нагрузках с внедренными волоконно-оптическими датчиками.
- 2.3.2. Создание обучающих и контрольных выборок для обучения и тестирования нейронных сетей, направленных на автоматическую оценку текущего состояния объекта контроля в условиях приложенных статических нагрузок.
- 2.3.3. Разработка концепции, создание демонстратора интеллектуальной системы мониторинга механического состояния пластин и оболочек при статических нагрузках, основанной на волоконно-оптических датчиках.
- 2.3.4. Построение соотношений частного случая моментной теории упругости. Касательные усилия на поверхностях скольжения возникают от действия магнитных и/или силовых полей.
- 2.4.1. Синтез магнитных жидкостей на основе силиконовых и углеводородных жидкостей-носителей, обладающих низкой (до минус 60 °С) температурой замерзания.
- 2.4.2. Разработка макета оснастки для создания магнитожидкостного контакта ультразвукового датчика.
- 2.4.3. Численное исследование задачи о сборе остаточной пленки магнитной жидкости с испытываемой детали.

- 2.5.1. Экспериментальное определение механических свойств нанокомпозитов, связующим которых является бутадиен-нитрильный каучук с наполнителями различного состава и объемной доли.
- 2.5.2. Сравнительный анализ полученных данных о механических свойствах с целью установления связи между рецептурой эластомерных нанокомпозитов и их механическими свойствами.
- 2.5.3. Наполнение базы данных о микроструктуре различных нанокомпозитов и формирование обучающей выборки. Обучение нейронной сети и ее тестирования на контрольной независимой выборке.

Оценка прочности и ресурса машин, конструкций и сооружений

- 2.6.1. Проведение экспериментального исследования устойчивости остаточных напряжений в титане при коррозионных и температурных воздействиях.
- 2.6.2. Определение оптимального режима обработки минимизирующего эффект наводораживания и повышающего коррозионную устойчивость титана ВТ6.
- 2.6.3. Проведение исследований методами микроскопии поверхностей МДО покрытий и их изменений в процессе трения. Решение задач оптимизации системы покрытие – подложка по критерию минимизации разрушения покрытия на границе его раздела с подложкой.
- 2.6.4. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в однородных и неоднородных материалах (в том числе в материалах с покрытиями) в условиях фрикционного взаимодействия; разработка расчетного метода анализа влияния абразивного изнашивания контактирующих поверхностей и наличия подповерхностных остаточных напряжений на накопление контактно-усталостных повреждений.
- 2.6.5. Постановка и построение решения контактной задачи об установившемся скольжении периодического рельефа по поверхности вязкоупругого основания при наличии адгезионного притяжения с учетом зависимости поверхностной энергии от предыстории контактного взаимодействия поверхностей.
- 2.7.1. Проведение натурных (полевых) измерений деформаций несущих элементов камерной системы разработки и оседаний подработанных территорий с целью верификации построенных моделей деформирования горных пород и геосред.
- 2.7.2. Моновариантное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и накопления повреждений в несущих элементах камерной системы разработки, горном массиве над подработанными участками с учетом локализации зон пластичности и формирования магистральных нарушений.
- 2.7.3. Формулировка критериев устойчивости подземных сооружений, основанные на анализе полученных полевых наблюдений и численных экспериментов.
- 2.8.1. Проведение структурных исследований стадийности развития поврежденности методами рентгеновской томографии, интерферометрии рельефа поверхностей разрушения, электронной и оптической микроскопии для определения масштабных структурных инвариантов, характеризующих стадийность развития поврежденности, связь с критической динамикой развития дефектов.
- 2.8.2. Комплексный анализ полученных результатов об эволюции структуры

материалов различного типа с целью определения структурно-чувствительных параметров для включения их в широкодиапазонные уравнения в качестве внутренних параметров, характеризующих стадийность развития поврежденности и связанных с критической динамикой развития дефектов.

Турбулентность, магнитная гидродинамика, тепломассоперенос в многофазных и многокомпонентных средах

- 2.9.1** Модернизация разработанной математической модели с целью учета влияния на закрученные течения транзитного потока, численная реализация модернизированной модели и проведение верификационных расчетов.
- 2.9.2** Определение характеристик течений, возникающих при взаимодействии транзитных потоков и закрученных потоков жидких металлов для различных параметров силового воздействия.
- 2.9.3** Разработка конфигурации бесконтактных электромагнитных расходомеров для жидкометаллических теплоносителей атомных реакторов на быстрых нейтронах, либо для потоков жидких металлов и сплавов, ориентированных на предприятия черной и цветной металлургии.
- 2.10.1** Исследование влияния ионизации поверхности горной выработки на процесс сорбции.
- 2.10.2** Построение и программная реализация модели процесса сорбции газа с учетом ионизации поверхности горной выработки. Проведение верификационных расчетов.
- 2.10.3** Натурные измерения параметров воздушных потоков при различных режимах вентилирования на рудниках различной топологии.
- 2.10.4** Параметризация математической модели воздухораспределения в тупиковой выработке.
- 2.10.5** Разработка, программирование и отладка алгоритма решения обратной задачи воздухораспределения в сети горных выработок.
- 2.11.1** Исследование возникновения и нелинейных режимов конвекции многокомпонентных смесей с учетом эффекта термодиффузии в системах, состоящих из трех слоев, обладающих разной пористостью и проницаемостью и имитирующих синклинальную геологическую складку.
- 2.11.2** Исследование условий устойчивости равновесия вязкоупругой жидкости в замкнутой полости при подогреве снизу.
- 2.11.3** Исследование влияния реологических свойств жидкости на устойчивость фронта вытеснения в пористой среде при наличии внешнего периодического воздействия (без учета влияния трещин).
- 2.11.4** Экспериментальное исследование реологических характеристик растворов выбранных ПАВ с применением метода капиллярных волн и метода осциллирующей капли. Измерение краевого угла смачивания для выбранных пар раствор ПАВ - твердая фаза при различных концентрациях ПАВ.
- 2.11.5** Разработка технологий селективного забора воды из стратифицированных водоемов.
- 2.11.6** Развитие теории нефиковского транспорта в пористых средах с

адсорбцией/десорбцией частиц на стенках пористого скелета.

2.11.7 Динамика адсорбированных слоев поверхностно-активных веществ в гидродинамических системах.

2.11.8 Управление крупномасштабным турбулентным конвективным потоком наложенным горизонтальным перепадом температуры.

Научное издание

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях

**Отчетная конференция по итогам 2 этапа выполнения проекта
12 – 13 ноября 2025 г. Пермь**

Программа и тезисы докладов

Издается в авторской редакции
Техническая подготовка и обработка материалов
Н.А. Юрлова

Подписано в печать 28.10.2025
Формат 60x84 1/16. Усл. п.л. 8,25. Тираж 120 экз.
Заказ 221/2025

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

614018 г. Пермь, ул. Академика Королева, д.1

Отпечатано в типографии «Новопринт»
Адрес: 614000, г. Пермь, ул. Седова, 7, оф. 110
Тел.: (342) 204 5 992