Отчетная конференция по итогам 3 этапа выполнения проекта

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях

12–13 ноября 2026 г., 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 3 этапа выполнения проекта

12–13 ноября 2026 г.

Пермь, 2026

УДК [539.3](063)

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях. **Отчетная конференция по итогам 3 этапа выполнения проекта.** Пермь, 12−13 ноября 2026 г. Программа и тезисы докладов / ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2026. – 140с.

ISBN 978-5-6030113-2-5

Представлены программа и тезисы докладов конференции «**Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях**. **Отчетная конференция по итогам 3 этапа выполнения проекта**», проводимой Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Пермским федеральным исследовательским центром Уральского отделения Российской академии наук 12 – 13 ноября 2026 г.

Сборник отражает тематику конференции и содержит результаты исследований по проекту.

Издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-6030113-2-5

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, 2026 г.

© Авторы, 2026 г.

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Основная цель конференции состоит в подведении итогов 3 (заключительного) 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 подведение итогов выполнения проекта.



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

Научный комитет

Матвеенко 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

Ведерников Д.В., Дубовиков Е.А., Левченков М.Д., Лимонин М.В., Чернов А.В., Шаныгин А.Н. Комплексные лабораторно-экспериментальные исследования, направленные на определение рациональных значений параметров гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин, обеспечивающих максимальные значения целевых показателей за счет комплексного использования положительной синергетики, одновременно от структуры конструкции, характеристик встроенной системы мониторинга, значений параметров процесса изготовления ……. 21

Ганеев Р.И., Дубовиков Е.А., Лимонин М.В., Марескин И.В., Миргородский Ю.С., Фомин Д.Ю., Чернов А.В., Шаныгин А.Н. Разработка схемы и изготовление демонстратора комплексной встроенной системы мониторинга технического состояния для агрегатов/отсеков/фрагментов гипотетической интеллектуальной пробионической конструкции …… 23

Гусева Н.В., Дубовиков Е.А., Зиченков М.Ч., Миргородский Ю.С., Чернов А.В., Шаныгин А.Н. Экспериментально-теоретические исследования, направленные на валидацию эффективности использования встроенной системы мониторинга для гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин …… 25

Сероваев Г.С., Матвеенко В.П., Галкина Е.Б., Конюхов В.А., Кошелева Н.А., Федоров А.Ю. Исследование динамического отклика пластин с применением волоконно-оптических датчиков …… 27

Конюхов В.А., Матвеенко В.П., Степанов Р.А., Сероваев Г.С. Определение параметров импульсного воздействия на поверхности деформируемого тела с помощью рекуррентных нейронных сетей …… 29

Степанов Р.А. Нейросетевая локализация удара по динамическому отклику подкреплённой пластины …… 31

Конюхов В.А., Матвеенко В.П., Сероваев Г.С., Гусев Г.Н., Демус М.А. Концепция демонстратора системы определения координат и энергии удара по показаниям волоконно-оптических датчиков …… 33

Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеенко В.П., Сенин А.Н., Бочкарёв С.А., Юрлова Н.А. Регулирование собственной частоты колебаний совместным воздействием актуаторов из сплава с памятью формы и пьезоэлектрических элементов …….. 35

Роговой А.А., Столбова О.С. Микроструктурная модель поведения поликристалла ферромагнитного сплава с памятью формы …… 37

Крыласова О.С., Сомов С.А., Иванов А.С. Экспериментальное исследование зависимости объемного расхода пленочного течения магнитной жидкости от скорости движения зазора ……... 39

Крыласова О.С., Лебедев А.В., Сомов С.А., Иванов А.С. Моделирование оптимальной конфигурации магнитного поля для создания магнитожидкостного контакта ультразвукового датчика ……..... 41

Голдобин Д.С., Райхер Ю.Л. Увлечение магнитной жидкости движущейся границей наклонного зазора ……...…… 43

Свистков А.Л., Мохирева К.А. Экспериментальные исследования деформационного поведения нанокомпозитов при циклических нагрузках …. 45

Свистков А.Л., Изюмов Р.И. Анализ причинно-следственных связей между внутренней структурой нанокомпозитов и их физико-механическими свойствами ……..……. 48

Свистков А.Л., Мохирева К.А., Беляев А.Ю. Особенности влияния новых наполнителей на изменение механических свойств эластомерных материалов 51

Келлер И.Э., Салихова Н.К., Дудин Д.С. Модель формирования остаточных напряжений и искажений при возведении ребра на пластине проволочно-дуговой наплавкой и ее экспериментальная верификация …….. 53

Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Сабиров Р.Р., Угольников М.В., Ложкин Д.В. Экспериментальное исследование влияния лазерной ударной проковки на усталостную долговечность металлического образца, созданного технологией аддитивного производства …….. 56

Пантелеев И.А., Бартоломей М.Л., Вережак М.В., Кудряшев И.С., Гачегова Е.А. Экспериментальное исследование влияния лазерной ударной проковки на коррозионную устойчивость металлического образца, созданного технологией аддитивного производства …… 59

Торская Е.В., Хади А.А., Степанов Ф.И., Малышев В.Н., Буковский П.О., Муравьева Т.И., Щербакова О.О. Изучение усталостного разрушения модифицированных антифрикционных МДО покрытий при фрикционном нагружении ……..…… 62

Горячева И.Г., Яковенко А.А. Анализ влияния остаточных напряжений на контактно-усталостное изнашивание в условиях трения качения и скольжения однородных материалов и материалов с покрытиями …… 65

Цуканов И.Ю., Любичева А.Н. Исследование влияния геометрических параметров трехмерной текстуры поверхности на контактные характеристики при переходе от трения покоя к трению скольжения ……. 68

Барях А.А., Цаюков А.А., Евсеев А.В., Ломакин И.С., Федосеев А.К., Ударцев А.А. Теоретические подходы к обоснованию возможности повторной отработки калийных солей …….. 71

Барях А.А., Бельтюков Н.Л., Девятков С.Ю., Евсеев А.В., Паньков И.Л., Самоделкина Н.А. Результаты геомеханических исследований при опытно-промышленных испытаниях технологии повторной отработки калийных руд 75

Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Иванов С.В., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Геофизическое сопровождение повторной отработки калийных солей …… 77

Уваров С.В., Ефремов Д.В., Баяндин Ю.В., Никитюк А.С, Князев Н.А., Наймарк О.Б. Экспериментальное и теоретическое исследование механизмов переноса импульса в жидкостях при интенсивных воздействиях на основе регистрации гидро- и сонолюминесценции, развития кавитации …… 81

Банников М.В., Уваров С.В., Баяндин Ю.В., Савельева Н.В., Наймарк О.Б Экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей критичности стадийности поврежденности в композитных материалах с использованием метода корреляции цифровых изображений и оптоакустического метода ……..……... 83

Колесниченко И.В., Озерных В.С., Халилов Р.И. Генерация закрученного потока жидкого металла в цилиндрическом канале под действием постоянных и переменных магнитных полей …… 86

Окатьев Р.С., Фрик П.Г., Шестаков А.В., Полуянов А.О. Характеристики и устойчивость течений неоднородных электропроводных сред под воздействием внешнего магнитного поля ……. 88

Лосев Г.Л., Ельтищев В.А. Влияние закрутки потока жидкого металла на распространение температурных неоднородностей в цилиндрическом канале 90

Митрополит И.Ю., Мамыкин А.Д. Воздействие вращающегося магнитного поля на теплообмен в транзитном течении жидкого металла ……. 93

Кузнецова Ю.Л. Снижение концентрации сероводорода в тупиковых выработках калийных рудников ……. 95

Демин В.А., Демина Т.В., Коновалов В.В., Любимова Т.П. Трехмерное численное моделирование процесса переноса паров кремния в условиях среднего вакуума: эффект вертикального расположения тиглей ……... 97

Суханов А.Е., Левин Л.Ю., Мальцев С.В., Трушкова Н.А. Натурные измерения параметров загазованности и запыленности воздуха в горных выработках рудников различной топологии ……. 100

Семин М.А., Накаряков Е.В., Трушкова Н.А., Зайцев А.В., Левин Л.Ю. Параметризация математической модели газораспределения в тупиковой выработке и сети горных выработок …….. 103

Семин М.А., Колесов Е.В., Бублик С.А. Разработка, программирование и отладка алгоритма решения обратной задачи газораспределения на базе полученного ранее распределения расходов воздуха ……..……... 105

Любимова Т.П., Шубенков И.С., Ожгибесова Н.А., Прокопьев С.А. Конвекция жидких углеводородов в слоистой пористой среде, имитирующей комбинацию антиклинальной и синклинальной геологических складок ….. 108

Любимова Т.П., Ковалевская К.В. Влияние вибраций на условия устойчивости равновесия вязкоупругой жидкости в плоском горизонтальном слое, подогреваемом снизу …..…….. 111

Любимова Т.П., Иванцов А.О. Влияние пульсаций давления на устойчивость фронта вытеснения жидкости в ячейке Хеле-Шоу ……... 114

Алабужев А.А., Володин И.В. Осредненная динамика конвекции Марангони в тонкой пленке на вибрирующей подложке …… 116

Кучинский М.О., Любимова Т.П., Галишевский В.А. Экспериментальное исследование собственных колебаний воздушного пузырька, всплывающего в растворах выбранных ПАВ 119

Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Лепихин А.П. Предотвращение аварийных ситуаций, связанных с забором загрязненной воды из поверхностных водных объектов в зонах активного техногенеза ……..…… 121

Марышев Б.С., Клименко Л.С. Конвективная устойчивость горизонтального фильтрационного течения с учетом закупорки в обобщенной модели Козени-Кармана ……...…….. 124

Денисова М.О., Костарев К.Г. Капля с пузырьком газа в неоднородном растворе ПАВ ……..…… 127

Краснякова Е.А., Шмыров А.В., Мизев А.И. Влияние экстракции ПАВ на динамику гравитационного осаждения капли …….. 130

Сухановский А.Н., Васильев А.Ю., Плешков Р.А., Фрик П.Г. Влияние типа и неоднородности граничных условий на динамику крупномасштабной циркуляции ……..…… 133

Приложение……....……. 135

Программа



12 ноября

9:30 – 9:40	**Открытие работы конференции** Председатель: Матвеенко Валерий Павлович

Секция «Механика новых материалов и конструкций»

Заседание 1 Создание пробионических композитных конструкций и подходов к мониторингу их технического состояния на базе оптоволоконных датчиков

Ведущий: Матвеенко Валерий Павлович

9:40 – 9:50	Ведерников Д.В., Дубовиков Е.А., Левченков М.Д., Лимонин М.В., Чернов А.В., Шаныгин А.Н. Комплексные лабораторно-экспериментальные исследования, направленные на определение рациональных значений параметров гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин, обеспечивающих максимальные значения целевых показателей за счет комплексного использования положительной синергетики, одновременно от структуры конструкции, характеристик встроенной системы мониторинга, значений параметров процесса изготовления Докладчик: Марескин Иван Владимирович
9:50 – 10:00	Ганеев Р.И., Дубовиков Е.А., Лимонин М.В., Марескин И.В., Миргородский Ю.С., Фомин Д.Ю., Чернов А.В., Шаныгин А.Н. Разработка схемы и изготовление демонстратора комплексной встроенной системы мониторинга технического состояния для агрегатов/отсеков/фрагментов гипотетической интеллектуальной пробионической конструкции Докладчик: Ганеев Ришат Ильшатович
10:00 – 10:10	Гусева Н.В., Дубовиков Е.А., Зиченков М.Ч., Миргородский Ю.С., Чернов А.В., Шаныгин А.Н. Экспериментально-теоретические исследования, направленные на валидацию эффективности использования встроенной системы мониторинга для гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин Докладчик: Шаныгин Александр Николаевич

Заседание 2 Теоретические и экспериментальные исследования smart-материалов и систем мониторинга с использованием технологий нейронных сетей

Ведущий: Матвеенко Валерий Павлович

10:10 – 10:20	Сероваев Г.С., Матвеенко В.П., Галкина Е.Б., Конюхов В.А., Кошелева Н.А., Федоров А.Ю. Исследование динамического отклика пластин с применением волоконно-оптических датчиков Докладчик: Сероваев Григорий Сергеевич
10:20 – 10:30	Конюхов В.А., Матвеенко В.П., Степанов Р.А., Сероваев Г.С. Определение параметров импульсного воздействия на поверхности деформируемого тела с помощью рекуррентных нейронных сетей Докладчик: Конюхов Владислав Авенирович
10:30 – 10:40	Конюхов В.А., Матвеенко В.П., Сероваев Г.С., Гусев Г.Н., Демус М.А. Концепция демонстратора системы определения координат и энергии удара по показаниям волоконно-оптических датчиков Докладчик: Конюхов Владислав Авенирович
10:40 – 10:50	Степанов Р.А. Нейросетевая локализация удара по динамическому отклику подкреплённой пластины Докладчик: Степанов Родион Александрович
10:50 – 11:00	Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеенко В.П., Сенин А.Н., Бочкарёв С.А., Юрлова Н.А. Регулирование собственной частоты колебаний совместным воздействием актуаторов из сплава с памятью формы и пьезоэлектрических элементов Докладчик: Каменских Александр Олегович
11:00 – 11:10	Роговой А.А., Столбова О.С. Микроструктурная модель поведения поликристалла ферромагнитного сплава с памятью формы Докладчик: Столбова Ольга Серафимовна

11:10 – 11:30	**Перерыв**

Заседание 3 Синтез низкотемпературных магнитных жидкостей. Разработка технологии низкотемпературного ультразвукового контроля с применением магнитожидкостного акустического контакта

Ведущий: Райхер Юрий Львович

11:30 – 11:40	Крыласова О.С., Сомов С.А., Иванов А.С. Экспериментальное исследование зависимости объемного расхода пленочного

	течения магнитной жидкости от скорости движения зазора Докладчик: Сомов Сергей Андреевич
11:40 – 11:50	Крыласова О.С., Лебедев А.В., Сомов С.А., Иванов А.С. Моделирование оптимальной конфигурации магнитного поля для создания магнитожидкостного контакта ультразвукового датчика Докладчик: Крыласова Ольга Сергеевна
11:50 – 12:00	Голдобин Д.С., Райхер Ю.Л. Увлечение магнитной жидкости движущейся границей наклонного зазора Докладчик: Райхер Юрий Львович

Заседание 4 Определение механических свойств и построение моделей деформирования новых эластомерных нанокомпозитов

Ведущий: Келлер Илья Эрнстович

12:00 – 12:10	Свистков А.Л., Мохирева К.А. Экспериментальные исследования деформационного поведения нанокомпозитов при циклических нагрузках Докладчик: Свистков Александр Львович
12:10 – 12:20	Свистков А.Л., Изюмов Р.И. Анализ причинно-следственных связей между внутренней структурой нанокомпозитов и их физико-механическими свойствами Докладчик: Свистков Александр Львович
12:20 – 12:30	Свистков А.Л., Мохирева К.А., Беляев А.Ю. Особенности влияния новых наполнителей на изменение механических свойств эластомерных материалов Докладчик: Свистков Александр Львович

12:30 – 13:20	**ОБЕД**

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

Заседание 5 Оптимизация метода лазерной ударной проковки металлов и сплавов

Ведущий: Плехов Олег Анатольевич

13:20 – 13:30	Келлер И.Э., Салихова Н.К., Дудин Д.С. Модель формирования остаточных напряжений и искажений при возведении ребра на пластине проволочно-дуговой наплавкой и ее экспериментальная верификация Докладчик: Келлер Илья Эрнстович

13:30 – 13:40	Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Сабиров Р.Р., Угольников М.В., Ложкин Д.В. Экспериментальное исследование влияния лазерной ударной проковки на усталостную долговечность металлического образца, созданного технологией аддитивного производства Докладчик: Изюмова Анастасия Юрьевна
13:40 – 13:50	Пантелеев И.А., Бартоломей М.Л., Вережак М.В., Кудряшев И.С., Гачегова Е.А. Экспериментальное исследование влияния лазерной ударной проковки на коррозионную устойчивость металлического образца, созданного технологией аддитивного производства Докладчик: Гачегова Елена Алексеевна
13:50 – 14:00	Торская Е.В., Хади А.А., Степанов Ф.И., Малышев В.Н., Буковский П.О., Муравьева Т.И., Щербакова О.О. Изучение усталостного разрушения модифицированных антифрикционных МДО покрытий при фрикционном нагружении Докладчик: Торская Елена Владимировна
14:00 – 14:10	Горячева И.Г., Яковенко А.А. Анализ влияния остаточных напряжений на контактно-усталостное изнашивание в условиях трения качения и скольжения однородных материалов и материалов с покрытиями Докладчик: Горячева Ирина Георгиевна
14:10 – 14:20	Цуканов И.Ю., Любичева А.Н. Исследование влияния геометрических параметров трехмерной текстуры поверхности на контактные характеристики при переходе от трения покоя к трению скольжения Докладчик: Цуканов Иван Юрьевич

Заседание 6 Разработка научных основ технологии повторной отработки запасов полезных ископаемых

Ведущий: Барях Александр Абрамович

14:20 – 14:30	Барях А.А., Цаюков А.А., Евсеев А.В., Ломакин И.С., Федосеев А.К., Ударцев А.А. Теоретические подходы к обоснованию возможности повторной отработки калийных солей Докладчик: Цаюков Андрей Андреевич
14:30 – 14:40	Барях А.А., Бельтюков Н.Л., Девятков С.Ю., Евсеев А.В., Паньков И.Л., Самоделкина Н.А. Результаты геомеханических исследований при опытно-промышленных испытаниях технологии повторной отработки калийных руд Докладчик: Бельтюков Николай Леонидович

14:40 – 14:50	Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Иванов С.В., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Геофизическое сопровождение повторной отработки калийных солей Докладчик: Евсеев Антон Владимирович

Заседание 7 Разработка фундаментальных основ методологии прогнозирования свойств, ресурса и мониторинг состояния сложных инженерных и природных систем

Ведущий: Наймарк Олег Борисович

14:50 – 15:00	Уваров С.В., Наймарк О.Б, Баяндин Ю.В., Никитюк А.С., Ефремов Д.В. Экспериментальное и теоретическое исследование механизмов переноса импульса в жидкостях при интенсивных воздействиях на основе регистрации гидро- и сонолюминесценции, развития кавитации Докладчик: Уваров Сергей Витальевич
15:00 – 15:10	Банников М.В., Уваров С.В., Баяндин Ю.В., Савельева Н.В., Наймарк О.Б Экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей критичности стадийности поврежденности в композитных материалах с использованием метода корреляции цифровых изображений и оптоакустического метода Докладчик: Банников Михаил Владимирович

13 ноября

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

Заседание 8. Разработка научных основ устройств и технологий использования жидкометаллического теплоносителя в ядерной энергетике

Ведущий: Фрик Петр Готлобович

9:30 – 9:40	Колесниченко И.В., Озерных В.С., Халилов Р.И. Генерация закрученного потока жидкого металла в цилиндрическом канале под действием постоянных и переменных магнитных полей Докладчик: Колесниченко Илья Владимирович
9:40 – 9:50	Окатьев Р.С., Фрик П.Г., Шестаков А.В., Полуянов А.О. Характеристики и устойчивость течений неоднородных электропроводных сред под воздействием внешнего магнитного поля Докладчик: Окатьев Роман Сергеевич
9:50 – 10:00	Лосев Г.Л., Ельтищев В.А. Влияние закрутки потока жидкого металла на распространение температурных неоднородностей в цилиндрическом канале Докладчик: Лосев Геннадий Леонидович
10:00 – 10:10	Митрополит И.Ю., Мамыкин А.Д. Воздействие вращающегося магнитного поля на теплообмен в транзитном течении жидкого металла Докладчик: Митрополит Иван Юрьевич

Заседание 9 Разработка моделей газодинамики и тепломассообмена в подземных горных выработках

Ведущий: Любимова Татьяна Петровна

10:10 – 10:20	Кузнецова Ю.Л. Снижение концентрации сероводорода в тупиковых выработках калийных рудников 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: эффект

	вертикального расположения тиглей Докладчик: Коновалов Владимир Владиславович
10:30 – 10:40	Суханов А.Е., Левин Л.Ю., Мальцев С.В., Трушкова Н.А. Натурные измерения параметров загазованности и запыленности воздуха в горных выработках рудников различной топологии Докладчик: Суханов Андрей Евгеньевич
10:40 – 10:50	Семин М.А., Накаряков Е.В., Трушкова Н.А., Зайцев А.В., Левин Л.Ю. Параметризация математической модели газораспределения в тупиковой выработке и сети горных выработок Докладчик: Трушкова Надежда Анатольевна
10:50 – 11:00	Семин М.А., Колесов Е.В., Бублик С.А. Разработка, программирование и отладка алгоритма решения обратной задачи газораспределения на базе полученного ранее распределения расходов воздуха Докладчик: Бублик Сергей Анатольевич

11:00 – 11:20	**ПЕРЕРЫВ**

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

Ведущий: Мизев Алексей Иванович

11:20 – 11:30	Любимова Т.П., Шубенков И.С., Ожгибесова Н.А., Прокопьев С.А. Конвекция жидких углеводородов в слоистой пористой среде, имитирующей комбинацию антиклинальной и синклинальной геологических складок Докладчик: Шубенков Иван Сергеевич
11:30 – 11:40	Любимова Т.П., Ковалевская К.В. Влияние вибраций на условия устойчивости равновесия вязкоупругой жидкости в плоском горизонтальном слое, подогреваемом снизу Докладчик: Любимова Татьяна Петровна
11:40 – 11:50	Любимова Т.П., Иванцов А.О. Влияние пульсаций давления на устойчивость фронта вытеснения жидкости в ячейке Хеле-Шоу Докладчик: Иванцов Андрей Олегович

11:50 – 12:00	Алабужев А.А., Володин И.В. Осредненная динамика конвекции Марангони в тонкой пленке на вибрирующей подложке Докладчик: Алабужев Алексей Анатольевич
12:00 – 12:10	Кучинский М.О., Любимова Т.П., Галишевский В.А. Экспериментальное исследование собственных колебаний воздушного пузырька, всплывающего в растворах выбранных ПАВ Докладчик: Кучинский Михаил Олегович
12:10 – 12:20	Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Лепихин А.П. Предотвращение аварийных ситуаций, связанных с забором загрязненной воды из поверхностных водных объектов в зонах активного техногенеза Докладчик: Паршакова Янина Николаевна
12:20 – 12:30	Марышев Б.С., Клименко Л.С. Конвективная устойчивость горизонтального фильтрационного течения с учетом закупорки в обобщенной модели Козени-Кармана Докладчик: Марышев Борис Сергеевич а
12:30 – 12:40	Денисова М.О., Костарев К.Г. Капля с пузырьком газа в неоднородном растворе ПАВ Докладчик: Денисова Мария Олеговна
12:40 – 12:50	Краснякова Е.А., Шмыров А.В., Мизев А.И. Влияние экстракции ПАВ на динамику гравитационного осаждения капли Докладчик Краснякова Елена Александровна
12:50 – 13:00	Сухановский А.Н., Васильев А.Ю., Плешков Р.А., Фрик П.Г. Влияние типа и неоднородности граничных условий на динамику крупномасштабной циркуляции Докладчик: Сухановский Андрей Николаевич

13:00 – 13:20	**Подведение итогов выполнения проекта.** **Закрытие конференции** Председатель: Матвеенко Валерий Павлович

Тезисы докладов



КОМПЛЕКСНЫЕ ЛАБОРАТОРНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ АГРЕГАТОВ/ОТСЕКОВ ПЛАНЕРА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА, СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ, КОРПУСОВ МАШИН, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СИНЕРГЕТИКИ, ОДНОВРЕМЕННО ОТ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИИ, ХАРАКТЕРИСТИК ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА, ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Ведерников Д.В., Дубовиков Е.А., Левченков М.Д., Лимонин М.В., Чернов А.В., Шаныгин А.Н.

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

Проведенные в настоящей работе комплексные проектировочные исследования были направлены на определение рациональных значений параметров гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков конструкций для объектов отраслей промышленности, включая:

- носовой отсек делового сверхзвукового пассажирского самолета (СПС);
- лопасть ветрогенератора;
- горизонтальную балку строительного сооружения (Рис. 1).

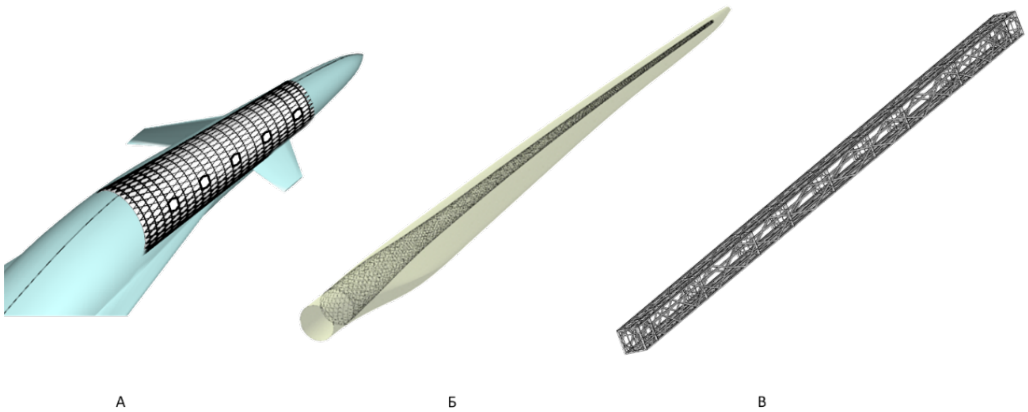


Рис. 1. - Расчетные МКЭ модели конструкции: а) носового отсека делового СПС б) лопасти ветрогенератора в) горизонтальной балки строительного сооружения.

При проведении проектировочных исследований учитывалась возможность улучшения целевых показателей исследуемых конструкций с учетом использования положительной синергии от взаимодействия элементов конструкции между собой, а

также от взаимодействия конструкции с встроенной системой мониторинга и параметрами, определяющими производственные процессы.

При проведении исследований были использованы результаты лабораторных испытаний элементарных и конструктивно-подобных образцов (КПО), а также отсека-демонстратора, полученные на текущем этапе работы. При испытании элементарных образцов получены жесткостные характеристики полимерных материалов, используемых для элементов системы защиты и образцов, изготовленных с помощью 3D печати. Широкий спектр лабораторно-экспериментальных данных был получен в ходе испытаний КПО плоской сетчатой панели, оснащенного встроенной системой мониторинга ударных воздействий на основе пьезоэлектрических датчиков:

- определены предельные значения чувствительности системы;
- оценены необходимые характеристики ее быстродействия;
- получены ограничения на значения конструктивных параметров про-бионической конструкции.

Изготовление отсека-демонстратора позволило подтвердить реализуемость предложенного на втором этапе работы принципа использования отдельных элементов конструкции в качестве технологической оснастки с одновременным включением их в состав конструкции в рамках производственного процесса.

Проектировочные исследования проводились в рамках многоуровневого алгоритма анализа прочности композитных конструкций, с учетом ограничений по ударной прочности [1].

В результате проведенных проектировочных исследований были получены рациональные значения параметров высоконагруженных отсеков/агрегатов и показано, что применение про-бионической конструкции позволяет:

- увеличить интервал периодического обслуживания конструкции отсека фюзеляжа пассажирского самолета в 1,5 раза;
- обеспечить надежность эксплуатации лопасти ветрогенератора с композитной сетчатой конструктивно-силовой схемой (КСС) на уровне надежности лопасти ветрогенератора с традиционной композитной стеночной КСС;
- использовать для строительных сооружений сценарий обеспечения ресурса по состоянию, а также повысить безопасность их эксплуатации в случаях возникновения ряда форс-мажорных обстоятельств.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.2.1

Литература

1. Шаныгин А.Н., Сапожников С.Б., Понькин А.В., Бабичев А.А., Лекомцев С.В., Многомасштабное моделирование деформирования и разрушения элементов композитной сетчатой оболочки при низкоскоростном ударе, Конструкции из композиционных материалов № 3, 2026, стр. 23- 34, DOI: 10.52190/2073-2562_2026_3_23

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕМОНСТРАТОРА КОМПЛЕКСНОЙ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ АГРЕГАТОВ/ОТСЕКОВ/ФРАГМЕНТОВ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРОБИОНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Ганеев Р.И., Дубовиков Е.А., Лимонин М.В., Марескин И.В., Миргородский Ю.С., Фомин Д.Ю., Чернов А.В., Шаныгин А.Н.

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

В ЦАГИ совместно с соисполнителями ЦНИИСМ и КНИТУ-КАИ был изготовлен демонстратор комплексной встроенной системы мониторинга технического состояния. Демонстратор включает сетчатый отсек, выполненный в виде цилиндрической оболочки на основе сетчатого композитного каркаса, и стенд для крепления и нагружения отсека, выполненный в виде рамной конструкции из стальных профильных труб. Отсек оснащен комплексной встроенной системой мониторинга технического состояния, состоящей из системы на основе волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОДД) для мониторинга нагруженности конструкции и системы на основе пьезоэлектрических датчиков для мониторинга ударных воздействий.

Основными целями создания демонстратора являются:

- валидация принципов работы комплексной системы мониторинга технического состояния;
- экспериментальная оценка эффективности работы комплексной системы мониторинга технического состояния;
- демонстрация реализуемости ресурсосберегающих (эко) способов изготовления про-бионических конструкций.

В рамках настоящей работы на втором этапе была разработана схема демонстратора и были сформированы нагрузки на конструкцию отсека, позволяющие провести валидационные исследования встроенной системы мониторинга технического состояния. Для выбранных силовых факторов были проведены проектировочные исследования конструкции отсека с учетом ограничений по прочности, устойчивости и жесткости. В рамках проектировочных исследований были получены рациональные значения конструктивных параметров отсека. На третьем этапе на основе полученных значений конструктивных параметров была изготовлена конструкция отсека (Рис. 1). В процессе изготовления конструкции отсека были использованы ресурсосберегающие (эко) способы изготовления – внутренняя обшивка и пенный заполнитель корневой и средней частей отсека формировали оснастку для выкладки реберного каркаса этих частей. При этом концевая часть отсека была выполнена с использованием традиционных для сетчатых конструкций способов изготовления [1], так как она, согласно разработанной схеме демонстратора, не содержит внутренней обшивки и пенного заполнителя.



Рис. 1. – Схема демонстратора комплексной встроенной системы мониторинга технического состояния и фото изготовленной конструкции отсека

Стенд был изготовлен из стальных профильных труб, стального листа и алюминиевых плит, с использованием сварных и болтовых соединений [2].

Для конструкции отсека была разработана, изготовлена и смонтирована система мониторинга ударных воздействий на основе пьезоэлектрических датчиков и высокоскоростного блока сбора данных. Также на конструкцию отсека были смонтированы ВОДД, используемые для мониторинга нагруженности его конструкции.

На основе подробного конечно-элементного моделирования были проведены прочностные и жесткостные расчетные исследования демонстратора, результаты которых в дальнейшем были использованы для валидации принципов работы системы мониторинга технического состояния и оценки эффективности ее работы.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.2.2.

Литература

1. V.V. Vasiliev, V.A. Barynin, A.F. Razin. «Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications», Composite Structures 94 (2012) 1117–1127
2. Марескин И.В., Ведерников Д.В., Левченков М.Д., Миргордский Ю.С., Сероваев Г.С., Шаныгин А.Н., "Испытательный стенд системы мониторинга состояния сетчатых композитных конструкций", патент РФ на полезную модель № 241923, 2026

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА ВАЛИДАЦИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЛЯ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ АГРЕГАТОВ/ОТСЕКОВ ПЛАНЕРА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА, СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ, КОРПУСОВ МАШИН

Гусева Н.В., Дубовиков Е.А., Зиченков М.Ч., Миргородский Ю.С., Чернов А.В., Шаныгин А.Н.

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

В рамках валидации эффективности использования встроенной системы мониторинга были исследованы: конструктивно подобный образец (КПО) плоской сетчатой панели с встроенной системой мониторинга ударных воздействий и сетчатый отсек с комплексной встроенной системой мониторинга технического состояния.

Система мониторинга ударных воздействий для КПО основана на пьезоэлектрических датчиках и модуле сбора данных с низкой частотой опроса. Для подобных систем был разработан новый алгоритм регистрации и определения локации ударных воздействий. Основной принцип, лежащий в основе алгоритма, состоит в суммировании деформаций, регистрируемых пьезоэлектрическими датчиками в точках расположения датчиков для нескольких (3-5) циклов колебаний панели, вызванных ударным воздействием. На основе полученных данных строится матрица влияния единичных ударных воздействий в точках расположения датчиков на значения деформаций в этих точках, по значениям которой и определяется локация ударного воздействия. В процессе валидационных исследований разработанного алгоритма был проведен сравнительный анализ подробного конечно-элементного моделирования деформаций в точках установки датчиков на КПО (Рис. 1) [1] и экспериментальных результатов - деформаций, получаемых с помощью системы мониторинга этого КПО. В результате сравнительного анализа была показана работоспособность и надежность разработанного алгоритма.

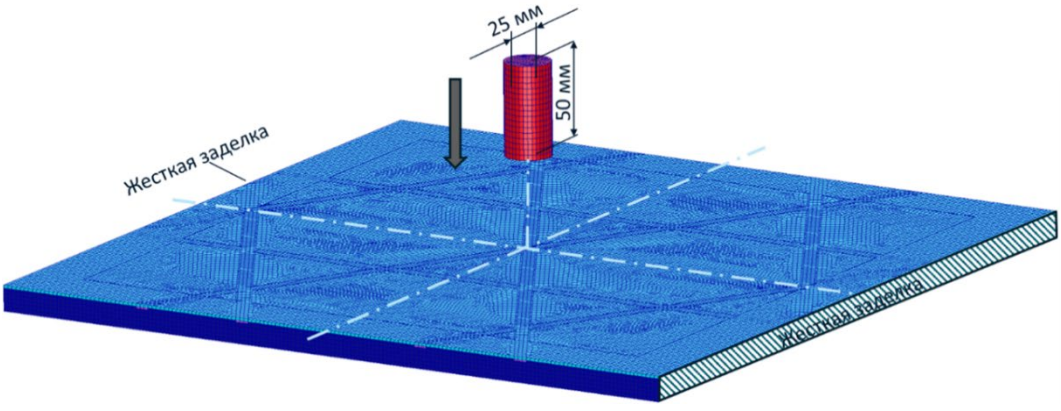


Рис. 1 - Расчетная схема для моделирования ударных воздействий на сетчатую панель.

Комплексная встроенная система мониторинга технического состояния отсека состоит из системы мониторинга ударных воздействий с высокой частотой опроса и системы мониторинга нагруженности конструкции, позволяющих упростить алгоритм поиска локаций ударных воздействий [2][3].

Расчетно-экспериментальные исследования отсека, по результатам которых была проведена валидация алгоритма работы системы мониторинга ударных воздействий с высокой частотой опроса, подтвердили способность системы не только определять локацию ударных воздействий, но и осуществлять их фильтрацию по уровню энергии воздействия. Также в результате проведенных исследований был валидирован алгоритм определения нагруженности конструкции отсека на основе показаний волоконно-оптических датчиков деформаций.

В рамках настоящей работы получена оценка эффективности применения встроенной системы мониторинга для гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.2.3.

Литература

1. Шаныгин А.Н., Сапожников С.Б., Понькин А.В., Бабичев А.А., Лекомцев С.В., Многомасштабное моделирование деформирования и разрушения элементов композитной сетчатой оболочки при низкоскоростном ударе, Конструкции из композиционных материалов № 3, 2026, стр. 23- 34, DOI: 10.52190/2073-2562_2026_3_23
2. Марескин И.В., Дубовиков Е.А., Сероваев Г.С., Фомин Д.Ю., Чернов А.В., Шаныгин А.Н., "Сетчатая оболочка из композиционных материалов", патент РФ на полезную модель № 242511, 2026
3. Марескин И.В., Ведерников Д.В., Левченков М.Д., Миргордский Ю.С., Сероваев Г.С., Шаныгин А.Н., "Испытательный стенд системы мониторинга состояния сетчатых композитных конструкций", патент РФ на полезную модель № 241923, 2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ПЛАСТИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Сероваев Г.С., Матвеенко В.П., Галкина Е.Б., Конюхов В.А., Кошелева Н.А., Федоров А.Ю.

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

Работа посвящена исследованию деформирования пластин при динамических нагрузках с применением внедренных и расположенных на поверхности волоконно-оптических датчиков (ВОД). В рамках проведенных экспериментов осуществлялось ударное воздействие на пластину, изготовленную методом послойного наплавления из термопластичного материала ABS с дисперсным наполнением углеродными волокнами. В работе оцениваются возможности регистрации динамических деформаций и выявления изменений граничных условий при совместном использовании точечных и распределенных ВОД.

Для измерения деформаций использованы точечные датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) и распределенные датчики на основе рэлеевского рассеяния, работающие по принципу оптической рефлектометрии в частотной области. Измерительные системы, работающие с этими типами датчиков, существенно различаются по максимальной частоте опроса, при этом датчики на основе ВБР обеспечивают измерение деформаций в предварительно заданных местах оптического волокна, где записаны брэгговские решетки, тогда как распределенные ВОД позволяют использовать всю длину оптического волокна в качестве чувствительного элемента и обеспечивают измерения в сотнях точек. Частота опроса используемого интеррогатора ВБР (HYPERION si255) составляет 5 кГц, а измерительной системы для распределенных ВОД (рефлектометр OSI-D) — до 100 Гц. Поскольку исследуемые частоты колебаний лежат в основном за пределами рабочего частотного диапазона распределенной измерительной системы, основным средством измерения ударного отклика выбраны датчики на основе ВБР. Распределенные ВОД использованы для определения пространственного распределения деформаций вдоль измерительных линий в статическом состоянии, при изменении условий закрепления и после ударного воздействия.

Для определения оптимального расположения ВОД выполнено конечно-элементное моделирование собственных частот и форм колебаний пластины. На основе результатов численного моделирования выбраны участки с наибольшими значениями измеряемой компоненты деформаций для исследуемых форм колебаний. Исследовано влияние положения ВОД по толщине пластины на чувствительность к ударному воздействию.

Динамическое нагружение пластины осуществлялось сбрасыванием груза заданной массы с разной высоты, что определяло энергию ударного воздействия. Рассмотрены следующие варианты граничных условий: размещение пластины на мягком основании без закрепления, опирание на поверхность без болтового закрепления, болтовое закрепление с различными моментами затяжки и локальное

ослабление отдельных болтов. Для каждого варианта выполнены повторные ударные воздействия при нескольких уровнях энергии.

На основе временных зависимостей деформаций, измеренных с помощью ВОД, получены графики спектральных откликов пластины и резонансные частоты колебаний. Экспериментально полученные резонансные частоты сопоставлены с результатами конечно-элементного моделирования для соответствующих граничных условий. Проанализированы изменения частотного состава и амплитуд отклика при варьировании энергии удара и состояния закрепления.

Для оценки демпфирования выполнена полосная фильтрация сигналов в окрестностях отдельных резонансных частот. В качестве основного параметра демпфирования рассмотрен логарифмический декремент затухания, который характеризует уменьшение амплитуды колебаний за один период. Величины логарифмического декремента затухания определены по уменьшению амплитуды составляющих свободных колебаний, выделенных с помощью полосной фильтрации.

В рамках исследования проведено последовательное снижение момента затяжки отдельных болтов и анализ влияния изменения граничных условий на спектральные характеристики пластины. Результаты использованы для оценки возможности определения типа и местоположения изменения граничных условий в задачах контроля механического состояния конструкций.

По данным распределенных ВОД сопоставлены распределения деформаций до и после ударных воздействий различной энергии. Исследовано деформированное состояние конструкции, сохраняющееся после ударного воздействия, а также перераспределение деформаций при изменении условий опирания и затяжки болтов.

Комплексное применение двух типов ВОД позволяет сочетать регистрацию динамического деформационного отклика и полученных на его основе спектральных характеристик и параметров демпфирования конструкции, с контролем изменения деформированного состояния конструкции после ударного воздействия. Полученные результаты могут быть использованы для выбора схем размещения ВОД, оценки возможностей диагностики изменений закрепления и дальнейшего развития методики исследования пластин и оболочек с применением точечных и распределенных ВОД.

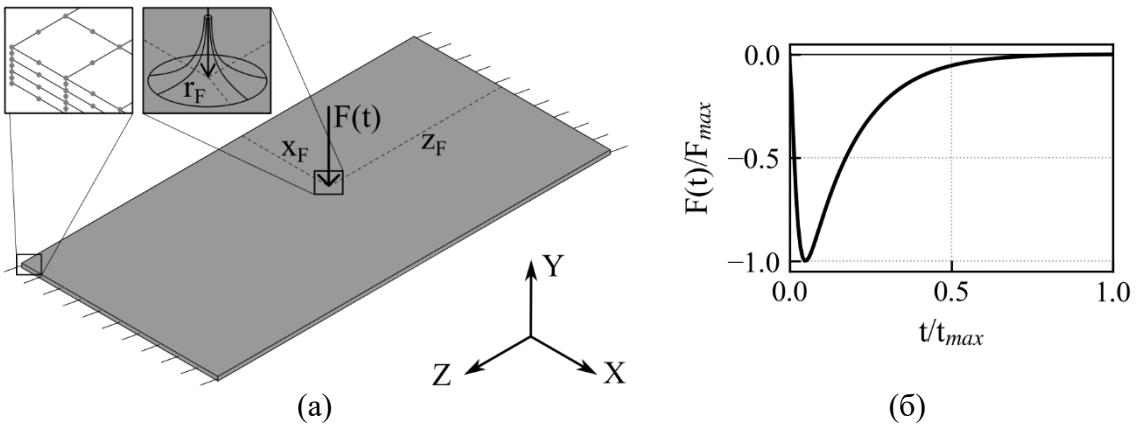
Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.3.1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Конюхов В.А., Матвеенко 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 методов машинного обучения для решения обратных задач механики деформируемого твердого тела. В качестве модельного примера рассмотрена тонкостенная пластина из упругого материала, жестко закрепленная по двум коротким сторонам, под действием локальной импульсной нагрузки, направленной по нормали к поверхности пластины (рис. 1). Результатом решения обратной задачи являются координаты точки приложения и энергия воздействия на основе информации о значениях деформаций в конечном числе точек.



(а) (б)

Рис. 1. – Тонкостенная пластина под действием локальной импульсной нагрузки: общий вид модельной задачи *(а)*; форма прикладываемого импульсного воздействия *(б)*

Набор данных, необходимый для подготовки модели машинного обучения, сформирован путем решения серии прямых задач определения напряженно-деформированного состояния (НДС) с применением метода конечных элементов в динамической постановке. Результат решения каждой отдельной прямой задачи представляет собой набор временных рядов $\varepsilon_{xx}(t)$ и $\varepsilon_{zz}(t)$, полученных для конечного числа точек на нижней поверхности пластины, при известном положении и энергии импульсного воздействия (x_F, z_F, E_{kin}). Далее временные ряды $\varepsilon_{xx}(t)$ и $\varepsilon_{zz}(t)$ именуются входными каналами, а наборы значений (x_F, z_F, E_{kin}) — выходными или целевыми параметрами.

Полученный набор данных, в соответствии с устоявшейся практикой подготовки нейросетевых моделей, был разделён на обучающую и валидационную подвыборки, после чего входные данные были стандартизованы, а выходные — масштабированы с помощью соотношений:

$$x_i^{std} = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}, \quad y_j^{scaled} = \frac{y_j - y_j^{\min}}{y_j^{\max} - y_j^{\min}},$$

где μ_i и σ_i — среднее значение и стандартное отклонение i-го входного канала, $y_j^{\min}$ и $y_j^{\max}$ — минимальное и максимальное значение j-го выходного параметра.

Параметры представленных преобразований рассчитывались на основе обучающей выборки, а обратное преобразование предсказанных значений в физические единицы выполнялось по тому же закону.

Для решения поставленной задачи рассматриваются рекуррентные нейронные сети на основе архитектур LSTM (Long Short-Term Memory) и GRU (Gated Recurrent Unit). Выбор данных архитектур обусловлен их эффективностью при обработке последовательных данных [1,2].

Вход моделей для одного примера данных представляет собой матрицу размера $N \times T$, где N — число входных каналов, T — число временных отсчётов. При пакетной обработке вход представляет собой трёхмерный тензор размера $B \times N \times T$, где B — размер одного пакета данных. Выход модели — вектор из трех масштабированных значений (x_F, z_F, E_{kin}), содержащий координаты точки приложения нагрузки и её энергию.

Ошибка локализации импульсной нагрузки для отдельного примера данных определялась как евклидово расстояние δ_{xz} между предсказанным $\left(x_F^{pred}, z_F^{pred}\right)$ и истинным $\left(x_F^{true}, z_F^{true}\right)$ положением центра области нагружения, а ошибка определения энергии воздействия – относительной ошибкой $\sigma_{E_{kin}}$:

$$\delta_{xz} = \sqrt{\left(x_F^{pred} - x_F^{true}\right)^2 + \left(z_F^{pred} - z_F^{true}\right)^2}, \quad \sigma_{E_{kin}} = \frac{\left|E_{kin}^{pred} - E_{kin}^{true}\right|}{\left|E_{kin}^{true}\right|} \cdot 100\%.$$

В работе представлены результаты сравнительного анализа точности рассматриваемых архитектур рекуррентных нейронных сетей в приложении к поставленной обратной задаче. Для обеспечения корректного сравнения параметры каждой конкретной модели были определены с применением алгоритма на основе байесовской оптимизации (Tree-structured Parzen Estimator, TPE) с использованием K-Fold кросс-валидации, а финальная оценка точности проведена на основе независимого тестового набора данных, сформированного с помощью метода латинского гиперкуба (Latin Hypercube Design, LHD).

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.3.2.

Литература

1. Kalhori H., Tashakori S., Choupan R. et. al. Impact force identification using memory-based neural networks: Application to cooling tower fan blades // International Journal of Impact Engineering. 2026. Vol. 216. 105779. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2026.105779
2. Mienye I.D., Swart T.G. and Obaido G. Recurrent Neural Networks: A Comprehensive Review of Architectures, Variants, and Applications // Information. 2024. Vol. 15, No 9. https://doi.org/10.3390/info15090517

Нейросетевая локализация удара по динамическому отклику подкреплённой пластины

Степанов Р.А.

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

Определение места удара по динамическому отклику конструкции представляет собой обратную задачу мониторинга её технического состояния. Для композитных панелей удар может вызвать внутренние повреждения при слабых внешних признаках, поэтому локализация помогает определить область последующего контроля. В работе [1] показана возможность локализации ударов на подкреплённых панелях нейронной сетью, обученной на расчётных сигналах. Проблема сохраняет актуальность несмотря на активные исследования возможностей машинного обучения. Выделяют проблемы малочисленных сенсорных сетей, влияния шума и переноса методов в реальные условия эксплуатации [2].

В настоящей работе предложено решение модельной задачи восстановления двух координат удара по четырём временным рядам поверхностных деформаций. Рассматривается шарнирно опёртая по контуру ортотропная пластина условно заданными геометрическими и упругими характеристиками, размером 2,0 × 1,7 м, аналогично [2] и толщиной 2,5 мм с четырьмя продольными рёбрами высотой 30 мм и толщиной 2 мм. Приняты E_1 = 65 ГПа, E_2 = 40 ГПа, G_{12} = 5 ГПа, ν_{12} = 0,27 и плотность 1550 кг/м³. Четыре датчика расположены вблизи углов (рис. 1а).

Для численного решения прямой задачи используется модальное представление, близкое по принципу сопряжения конструкции и ударника к подходу, предложенному в [3]. Здесь принята модель Кирхгофа с дискретными балочными рёбрами. Прогиб раскладывается по 2112 собственным формам. Ударник описывается точечной массой, связанной с пластиной односторонним нелинейным контактом Герца. Для рёбер принят модуль упругости 70 ГПа; коэффициент модального демпфирования равен 0,008. Сила контакта пропорциональна взаимному сближению в степени 3/2 и обнуляется при размыкании. Сигналом датчика служит среднее (εxx + εyy)/2 по площадке 10 × 10 мм (рис. 1б).

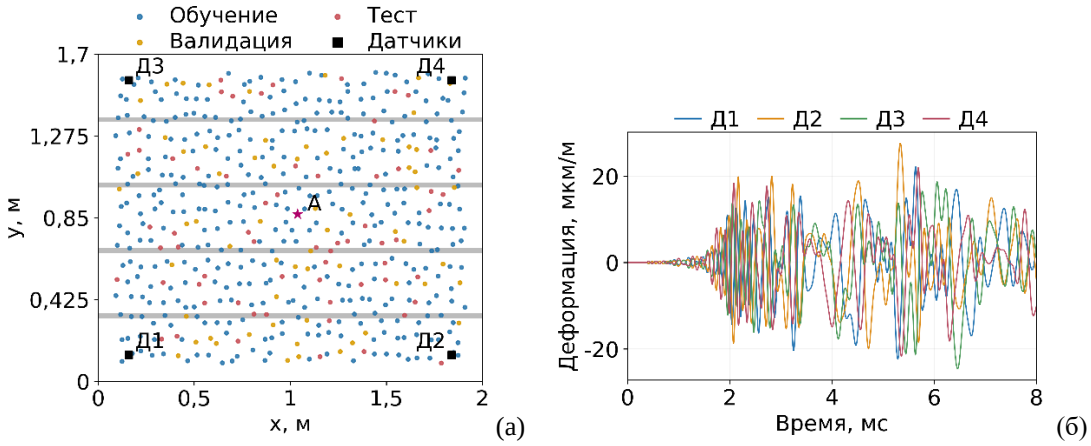


Рис. 1. - Пластина, рёбра, датчики и точки ударов (а). Пример сигналов четырёх датчиков для отмеченного удара (б).

Сформирована база из 3072 ударов с различным сочетание скорости, массы и стороны воздействия в 512 точках. Запись датчиков длительностью 8 мс содержит 1601 отсчёт при частоте 200 кГц. Обучающая, валидационная и тестовая выборки включают 2304, 384 и 384 события. Разделение выполнено по координатам: все шесть вариантов удара в одной точке относятся к одной выборке.

Сравниваются многослойный персептрон (MLP) и одномерная свёрточная сеть (CNN). Для MLP рассматриваются структуры 4–10–2 и 8–10–2. В первом случае входными признаками служат четыре времени прихода относительно самого раннего сигнала, во втором к ним добавляются четыре логарифма максимальных абсолютных амплитуд. CNN получает временные ряды, после чего общий свёрточный блок извлекает признаки каждого датчика и затем они объединяются с его координатами для регрессии координат удара. Модели имеют 72, 112 и 44 666 обучаемых параметров соответственно.

На чистом тесте среднее евклидово расстояние между истинной и предсказанной точками удара, усреднённое по трём запускам с различной инициализацией весов, составила 125,6 мм для MLP по временам прихода, 80,8 мм при добавлении амплитуд и 53,3 мм для CNN. Для CNN средний 90-й процентиль ошибки равен 94,0 мм; около 92% прогнозов находятся в радиусе 100 мм. На рис. 2 приведены распределения ошибок. Результаты предварительные и относятся к синтетической базе: сходимость высокочастотного отклика по числу мод и перенос на эксперимент требуют отдельной проверки. Полученные результаты показывают перспективность использования CNN для локализации удара по динамическому отклику подкреплённых пластин

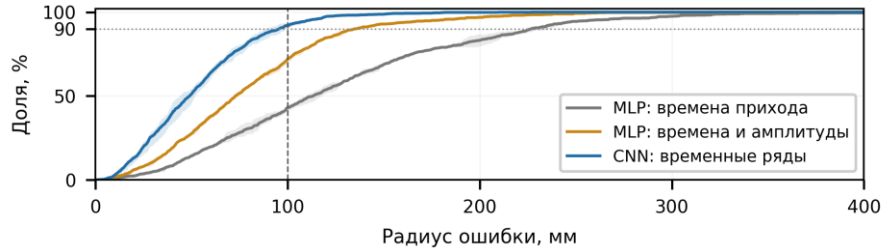


Рис. 2. - Накопленное распределение ошибки на чистом тесте

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.3.2

Литература

1. Sharif-Khodaei Z., Ghajari M., Aliabadi M.H. Determination of impact location on composite stiffened panels // Smart Mater. Struct. 2012. Vol. 21. 105026. https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/10/105026
2. Kalhori H. et al. Advances in impact force identification: A comprehensive review of techniques and mathematical innovations // Results in Engineering. 2025. Vol. 26. 105568. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105568
3. Janda T. et al. Reduced order models of elastic glass plate under low velocity impact // Computers & Structures. 2021. Vol. 244. 106430. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106430

КОНЦЕПЦИЯ ДЕМОНСТРАТОРА СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ЭНЕРГИИ УДАРА ПО ПОКАЗАНИЯМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Конюхов В.А., Матвеенко В.П., Сероваев Г.С., Гусев Г.Н., Демус М.А.

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

В работе представлена концепция лабораторного демонстратора системы определения параметров ударного воздействия на пластину по показаниям волоконно-оптических датчиков (ВОД). Демонстратор объединяет регистрацию динамического деформационного отклика, его обработку и использование предварительно обученной нейронной сети. Демонстрационная система предназначена для определения координат места приложения ударной нагрузки и оценки энергии удара по показаниям ВОД при фиксированных условиях закрепления пластины.

В качестве объекта контроля рассматривается пластина, изготовленная методом послойного наплавления из термопластичного материала ABS с дисперсным наполнением углеродными волокнами и жестко закрепленная по двум противоположным сторонам. Граничные условия сохраняются неизменными в пределах рассматриваемой задачи. Ударное воздействие создается сбрасыванием груза с заданной высоты. В качестве энергетической характеристики принимается энергия воздействия, определяемая массой груза и высотой падения.

Динамические деформации регистрируются точечными ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) с использованием интеррогатора с частотой опроса 5 кГц. Размещение чувствительных элементов определяется на основе численного моделирования деформационных форм колебаний с учетом направления и глубины внедрения оптического волокна. Совместная обработка временных сигналов датчиков, расположенных в разных местах конструкции, направлена на использование различий деформационного отклика для восстановления положения и энергии источника воздействия.

Для обработки данных с применением нейронных сетей используются результаты пункта исследований, посвященного формированию обучающих и контрольных выборок и сравнению архитектур нейронных сетей, применимых для решения данной задачи. В демонстратор включается выбранная модель, обученная на временных рядах деформаций при известных координатах и энергии воздействия. При подготовке входных данных нейронной сети учитываются фактическое расположение и ориентация датчиков, частота дискретизации, длительность анализируемых сигналов и формат представления данных.

Предложенная концепция допускает использование различных измерительных систем, обеспечивающих регистрацию динамических деформаций с требуемыми характеристиками и программный доступ к измерительным данным. Конкретная реализация демонстратора ориентирована на работу с системой опроса волоконных брэгговских решеток HYPERION si255. Получение измерительных данных и их передачу в программное обеспечение демонстратора

предусматривается осуществлять посредством программного интерфейса интеррогатора (API).

Работа демонстратора предусматривает осуществление измерений деформаций во времени с помощью ВОД, потоковую передачу и прием данных в программном обеспечении демонстратора, обнаружение ударного события, выделение временного фрагмента отклика, подготовку входных данных нейронной сети, оценку местоположения и энергии ударного воздействия. Полученные оценки координат и энергии передаются в модуль отображения. Для последующего анализа предусмотрено сохранение исходных записей, результатов обработки и используемых параметров.

В программном обеспечении демонстратора положение удара отображается на схеме пластины, а оценка энергии ударного воздействия, в числовом виде. Измеренные деформации представляются в виде временных зависимостей. При испытаниях полученные оценки могут быть сопоставлены с контрольными координатами и номинальной энергией, заданными условиями сбрасывания груза. Контрольные значения используются для проверки точности результатов работы системы демонстратора.

Программа экспериментальной апробации включает повторные удары в различных точках пластины при нескольких уровнях энергии и неизменном закреплении. Для проверки предусматривается независимая серия воздействий, не использованная при обучении и настройке модели. Ошибка локализации ударного воздействия оценивается расстоянием между заданной и предсказанной точками удара, ошибка определения энергии — абсолютным и относительным отклонениями от контрольного значения.

Предложенная концепция служит основой для создания программно-аппаратного комплекса идентификации ударных воздействий по измерениям динамических деформаций с помощью волоконно-оптических датчиков.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.3.3.

РЕГУЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ СОВМЕСТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ АКТУАТОРОВ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеенко В.П., Сенин А.Н., Бочкарёв С.А., Юрлова Н.А.

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

Эффективная работа преобразователей энергии колебаний на основе пьезоэлектрических элементов [1] требует согласования собственной частоты колебаний конструкции и с частотой внешней возбуждающей силы, потому что вырабатываемая мощность существенно снижается вне резонансных режимов. Возможность регулирования фундаментальной собственной частоты колебаний значительно расширяет условия эксплуатации таких устройств [2]. В данном исследовании для этой цели предлагается совместно использовать проволочный актуатор из сплава с памятью формы и пьезоэлемент. Первый развивает большие усилия и изменяет напряжённо-деформированное состояние несущей конструкции, но его надёжная работа возможна только в полностью аустенитном или полностью мартенситном состояниях. При неполном фазовом превращении обеспечить стабильное функционирование такого актуатора в процессе колебаний достаточно сложно. Пьезоэлемент создаёт значительно меньшие деформации, но зато позволяет осуществлять их точное регулирование за счёт электрического напряжения. Совместное применение этих двух актуаторов обеспечит изменение собственной частоты в широком диапазоне и её дополнительную точную настройку на резонанс.

В демонстрационном примере рассматривается алюминиевая пластина, жёстко закреплённая по двум противоположным сторонам. По её центру проходит проволока из сплава с памятью формы, способная укорачиваться в свободном состоянии из-за фазового превращения на 8% ($\varepsilon_{SMA} = 8\%$). На поверхности пластины размещён пьезоэлемент из ЦТС-19, поляризованный по толщине.

Моделирование выполнено методом конечных элементов в ANSYS Mechanical. Поведение пластины и пьезоэлемента описывается соотношениями теории упругости (SOLID186) и электроупругости (SOLID226), а для проволоки применяется теория балок Тимошенко (BEAM189). Эффект памяти формы реализуется через температурную аналогию, которая позволяет описать фазово-структурную деформацию и упругий отклик актуатора и пластины. Сначала решается геометрически нелинейная статическая задача. Полученное напряжённо-деформированное состояние затем учитывается в модальном анализе посредством матриц дополнительной жёсткости и изменения конечно-элементной сетки.

Зависимости низшей собственной частоты колебаний f_1 и её относительного изменения Δf_1 от напряжения U приведены на рисунке. Для каждого значения ε_{SMA} величина Δf_1 определяется относительно состояния при $U = 0$:

$$\Delta f_1 = \frac{f_1(U)}{f_1(0)} - 1,$$

где $f_1(U)$ — низшая собственная частота при напряжении U на пьезоэлементе.

Проволочный актуатор обеспечивает существенное изменение низшей собственной частоты колебаний пластины. Для малых значений ε_{SMA} дополнительное воздействие пьезоэлемента незначительно, а с увеличением предварительной деформации его влияние возрастает. При $\varepsilon_{SMA} = 8\%$ возможно повышение частоты на 11.7% и понижение на 3.1%.

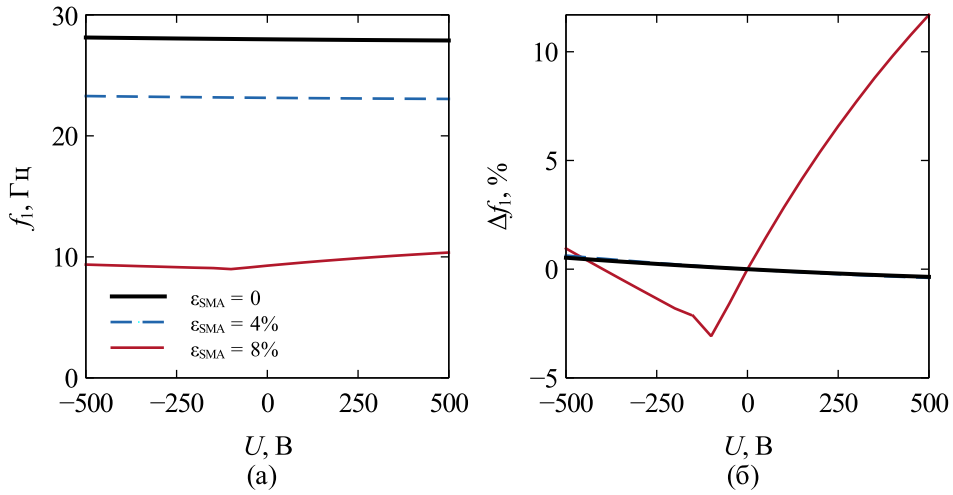


Рис. - Низшая собственная частота пластины (а) и её относительное изменение (б) в зависимости от напряжения U на пьезоэлементе при трёх уровнях ε_{SMA}

Расчёты показали возможность дополнительной настройки частоты пьезоэлементом при заданном укорочении проволоки из сплава с памятью формы, эффективность которой зависит от предварительного напряжённо-деформированного состояния пластины.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024), задача № 3.3.4.

Литература

1. Yang Z., Zhou S., Zu J., Inman D. High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications // Joule. 2018. Vol. 2, No. 4. P. 642–697. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.011
2. Liu X., He L., Liu R., Hu D., Zhang L., Cheng G. Piezoelectric energy harvesting systems using mechanical tuning techniques // Review of Scientific Instruments. 2023. Vol. 94, No. 3. Article No. 031501. https://doi.org/10.1063/5.0120778.

МИКРОСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛА ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Роговой А.А., Столбова О.С.

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

В данной работе для сплава Гейслера Ni-Mn-Ga (ферромагнитного сплава с памятью формы) [1], относящегося к классу функциональных материалов, развивается микроструктурный подход, позволяющий моделировать процессы намагничивания и переориентации мартенситных вариантов [2]. При охлаждении материала происходит прямой фазовый переход первого рода из высокотемпературного аустенитного состояния в низкотемпературное мартенситное состояние, при котором кубическая кристаллическая ячейка преобразуется в тетрагональную. Для минимизации возникающих при этом внутренних напряжений, в соответствии с принципом Ле Шателье – Брауна, сплав образует двойниковую структуру. В таком материале одновременно и неразрывно существуют деформационные двойники, возникающие вследствие выполнения условия совместности деформаций Адамара, и структурные двойники, в которых короткие оси тетрагональных ячеек (оси легкого намагничивания) в смежных мартенситных пластинах взаимно повернуты на 90°. Приложение внешнего магнитного поля инициирует процесс раздвойникования (переориентации мартенситных вариантов), сопровождающийся значительной структурной деформацией, на порядок превышающей упругую.

Для расчета магнитных полей вместо трудоемкого численного интегрирования полного уравнения Ландау – Лифшица – Гильберта, описывающего динамику прецессии вектора намагниченности, было обосновано и использовано условие коллинеарности этого вектора и вектора эффективного магнитного поля в установившемся состоянии [3, 4]. Поле размагничивания рассчитывалось через скалярный магнитный потенциал на основе уравнений магнитостатики. Дифференциальным уравнениям были поставлены в соответствие вариационные уравнения, что позволило на порядок снизить требования к гладкости искомого решения и эффективно реализовать задачу методом конечных элементов.

Для описания поведения поликристалла, представительный объем которого сформирован набором одинаковых сдвойникованных мартенситных структур (зерен монокристаллов), по-разному ориентированных в пространстве, необходимо предварительно определить магнитный отклик каждого отдельного зерна. На первом этапе, опираясь на разработанное ранее условие коллинеарности с учетом обменного взаимодействия [5], были рассчитаны кривые намагничивания одиночного зерна при различных направлениях внешнего магнитного поля относительно осей анизотропии. В рамках этих расчетов процесс переориентации мартенситных вариантов приводил к росту выгодно ориентированных по отношению к полю вариантов мартенсита и одновременному уменьшению невыгодно ориентированных. Поскольку в реальном материале такая структурная

перестройка не происходит мгновенно во всем объеме, учитывалась размытость данного структурного перехода: введена гладкая функция, определяющая объемную долю перестроенного материала (долю выросших выгодных вариантов) в зависимости от величины приложенного поля.

На следующем этапе, на основе рассчитанных откликов одиночных зерен, формируется макроскопическая кривая намагничивания поликристалла. Представительный объем поликристалла моделируется совокупностью зерен с различными начальными ориентациями осей анизотропии относительно направления внешнего поля (в расчетах рассмотрены углы 0°, 30°, 45°, 60° и 90°). Итоговая намагниченность вычисляется по правилу смесей путем статистического осреднения откликов всех зерен с учетом их объемных долей. Поскольку каждое зерно переориентируется при своем значении магнитного поля, резкие скачки, характерные для монокристалла, сглаживаются на кривой намагничивания поликристалла.

В дальнейшем планируется учесть в разработанной модели поликристалла влияние внешних механических нагрузок на процесс переориентации мартенситных вариантов.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.3.5.

Литература

1. Васильев А. Н., Бучельников В. Д., Такаги Т., Ховайло В. В., Эстрин Э. И. Ферромагнетики с памятью формы // Успехи физических наук. 2003. Т. 173, № 6. С. 577-607. https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200306a.0577.
2. 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.
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. P. 855-870. https://doi.org/10.1134/S0031918X25601155.
4. Роговой А.А., Столбова О.С. Новый подход к моделированию магнитного поведения сплава Гейслера // Физика металлов и металловедение. 2025. Т. 126, № 9. С. 1001-1012. https://doi.org/10.7868/S3034621525090055.
5. Роговой А.А., Столбова О.С. Уравнение коллинеарности при построении 3D-модели магнитного поведения ферросплава // Физика металлов и металловедение. 2026. (в печати)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ОТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЗАЗОРА

Крыласова О.С., Сомов С.А., Иванов А.С.

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

Магнитная жидкость – это коллоидный раствор однодоменных ферро- или ферримагнитных наноразмерных частиц [1]. Благодаря сочетанию своих уникальных свойств, а именно текучести и способности намагничиваться во внешних магнитных полях, магнитные жидкости долгие годы находят применение в различных областях науки и техники. В некоторых задачах возникают различные типы течений жидкости, одним из которых может являться пленочный. В данном случае магнитные жидкости обладают весомым преимуществом благодаря наличию магнитной силы – управление течением может производиться с помощью подходящей конфигурации магнитного поля.

В работе [2] была решена гидродинамическая задача об увлечении магнитной жидкости движущейся границей плоского зазора: в зазоре есть мостик из магнитной жидкости, при движении нижней границы образуется пленочное течение, вызывающее расход жидкости. Авторами была получена зависимость объемного расхода от скорости движения границы зазора и прочих характеристик. Решение задачи производилось в приближении Ландау-Левича. Полученные результаты могут быть полезны в задачах ультразвуковой дефектоскопии [3]. Целью работы является проведение эксперимента по нахождению зависимости объемного расхода магнитной жидкости от скорости движения нижней границы зазора и последующее сравнение полученных результатов с теоретической моделью.

Для проведения эксперимента была сконструирована лабораторная установка, имитирующая движение поверхности. Установка создавалась на базе 3D-принтера, что позволяло непосредственно использовать имеющиеся приводы и направляющие для позиционирования датчика. Схема установки представлена на рис. 1а. Она была дополнена стеклянной поверхностью, оптической системой, датчиком, а также системой подачи магнитной жидкости. Для управления датчиком использовалось программное обеспечение Cura, в котором генерировался G-код. При помощи программного кода задавалась рабочая высота датчика, а также траектория нанесения магнитной жидкости – такой подход гарантирует повторяемость геометрии движения и стабильность рабочего зазора.

Толщина нанесенного слоя магнитной жидкости определялась на просвет: при прохождении луча лазера через слой магнитной жидкости его интенсивность падает по закону Бугера-Ламбера-Бера

$$\mathrm{I} = I_0 exp(-\kappa\varphi \mathrm{d}),$$

где I – интенсивность света после прохождения через магнитную жидкость, I_0 – интенсивность света лазера, κ – коэффициент поглощения магнитной жидкости, φ – объемная доля твердой фазы, d – толщина слоя магнитной жидкости. Получение значений толщины слоя магнитной жидкости d позволит вычислить объемный

расход магнитной жидкости Q = 2*Rdv*, где *R* – радиус пятна, *d* – толщина слоя, *v* – скорость движения пластины.

В работе были использованы три образца магнитной жидкости типа магнетит-керосин-олеиновая кислота с различной объемной долей твердой фазы *φ*. Эксперимент проводился при трех значениях скорости – 4 мм/с, 6 мм/с и 10 мм/с. Теоретическая модель, представленная в работе [2], предсказывает зависимость вида $Q \sim v^{5/3}$. Результаты экспериментального исследования представлены на рис.1б в виде зависимости типа $\ln Q = a \ln v + b$: полученные результаты согласуются с теоретической моделью.

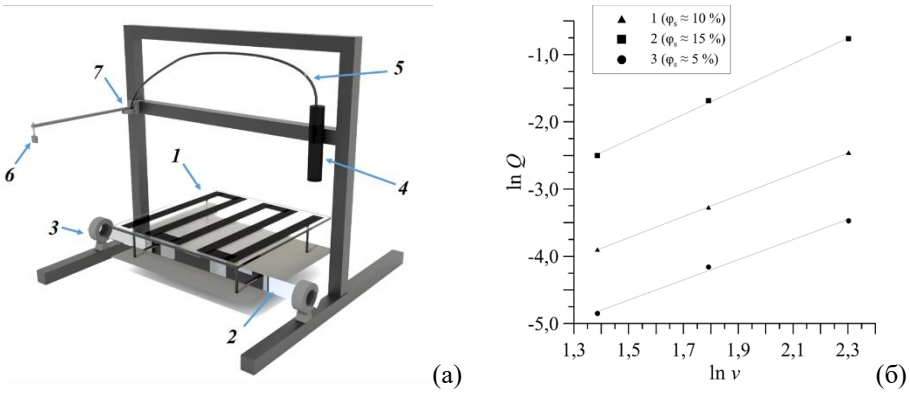


Рис. 1. - Схема лабораторной установки: 1 – стеклянная пластина, 2 – зеркало, 3 – боковые механизмы для регулировки зеркала, 4 – резервуар с магнитной жидкостью, 5 – фторопластовый канал, 6 – зеркало, 7 – датчик, 8 – слой магнитной жидкости (*а*); зависимость натурального логарифма объемного расхода *Q* от натурального логарифма скорости движения границы *v* (*б*)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.4.1.

Литература

1. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // УФН. 1974. Т. 112, №. 3. С. 427-458. https://doi.org/10.3367/UFNr.0112.197403b.0427
2. Goldobin D.S., Raikher Yu. L. Entrainment of magnetic fluid by a moving boundary of a plane gap // Phys. of Fl.. 2026. Vol. 38, no. 8. P. 083109. https://doi.org/10.1063/5.0334661
3. Коровин В.М., Коровина Л.А., Райхер Ю.Л. Ультразвуковой преобразователь для работы с магнитожидкостным контактным слоем // Дефектоскопия. 1988. № 4. С. 79-87.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО КОНТАКТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА

Крыласова О.С., Лебедев А.В., Сомов С.А., Иванов А.С.

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

Ультразвуковая (УЗ) дефектоскопия – метод выявления дефектов в различных изделиях с помощью эхозондирования. Для более эффективной передачи сигнала используется контактная жидкость, которая заполняет зазор между датчиком и поверхностью проверяемого изделия. Крайне необходимо поддерживать подобный акустический контакт во избежание поломки изделия или неверных результатов сканирования. Типичные жидкости, такие как вода, масла или глицерин имеют ряд недостатков, например, они растекаются под действием силы тяжести, тем самым нарушая работоспособность устройства. В качестве альтернативы таким жидкостям может использоваться магнитная жидкость [1]. Благодаря сочетанию текучести и способности намагничиваться в магнитном поле управление течением магнитной жидкости возможно путем подбора оптимальной конфигурации магнитного поля. Для этого датчик оснащается магнитной системой, которая будет удерживать магнитную жидкость в зазоре и предотвращать ее растекание. Для эффективного использования магнитной жидкости в качестве контактной, необходимо подобрать подходящую магнитную систему и изучить свойства пленочных течений, возникающих при динамическом сканировании поверхности. В данной работе представлено моделирование оптимальной конфигурации магнитного поля для создания магнитожидкостного контакта ультразвукового датчика.

При проектировании магнитной системы датчика необходимо удостовериться, что выбранная система удерживает магнитную жидкость на торце УЗ-датчика, то есть обеспечивает достаточную площадь контакта. Моделирование магнитных систем выполнялось в пакете программ FEMM (Finite Element Method Magnetics), предназначенного для численного решения двумерных магнитостатических задач методом конечных элементов. Численное моделирование магнитостатических задач производится в терминах магнитного потенциала. В рамках работы были рассмотрены системы из кольцевого магнита, шарового магнита, уединенного магнитного полюса, а также комбинированный источник магнитного поля, представляющего собой систему кубических магнитов.

Минимальной модификации датчика потребовала бы магнитная система, содержащая кольцевой магнит, однако существенным минусом такой системы является то, что в месте контакта образуется область, отвечающая минимуму, тем самым в месте возможного контакта образуется пузырек воздуха. Его появление крайне нежелательно, поскольку в дальнейшем при работе датчик может распознать пузырек как дефект. Таким образом, чтобы избежать подобного явления следует использование кольцевых магнитов нежелательно.

Использование уединенного полюса или шарового магнита предполагает непосредственное внедрение в само тело датчика, но при этом их конфигурация

магнитного поля позволяет надежно удерживать магнитную жидкость в месте возможного контакта.

Другим возможным способом является сборка из кубических магнитов: в напечатанную на 3D-принтере кольцевую форму помещаются кубические магниты. Кольцевая насадка позволит избежать инвазивного внедрения в сам корпус датчика. В рамках исследования варьировались углы наклона, геометрические параметры датчиков, рассматривались различные способы размещения магнитов с целью компенсации минимума в предполагаемом месте контакта. Результаты моделирования подтверждались экспериментально путем изучения свободной поверхности магнитной жидкости в поле соответствующих систем.

Результаты моделирования для системы кубических магнитов представлены на рис. 1а, результат эксперимента представлен на рис. 1б: в месте возможного контакта нет ярко-выраженного минимума, что позволяет использовать такую конфигурацию для создания магнитожидкостного контакта ультразвукового датчика.

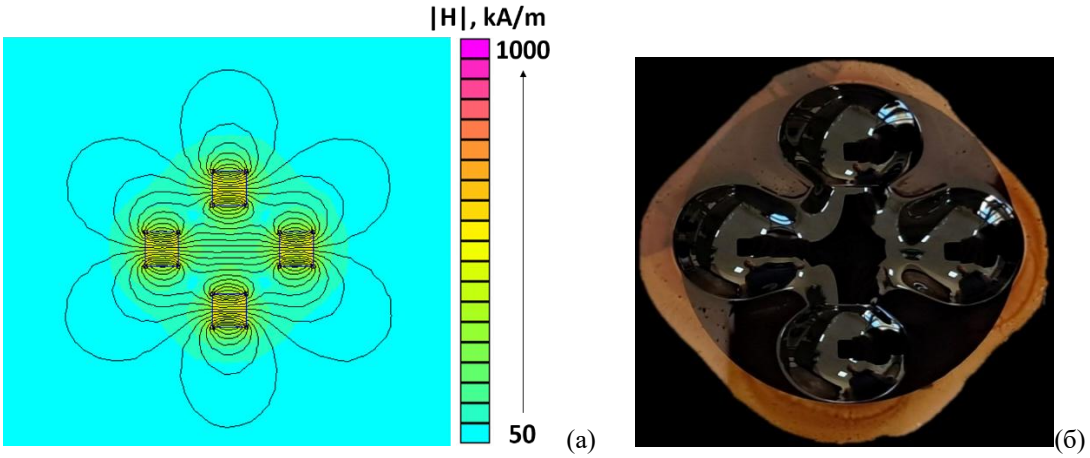


Рис. 1. – Картина распределения модуля напряженности магнитного поля |H| вблизи рассматриваемой системы из кубических магнитов (*а*); форма свободной поверхности магнитной жидкости вблизи рассматриваемой системы из кубических магнитов (*б*)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.4.2.

Литература

1. Goldobin D.S., Raikher Yu. L. Entrainment of magnetic fluid by a moving boundary of a plane gap // Phys. of Fl.. 2026. Vol. 38, no. 8. P. 083109. https://doi.org/10.1063/5.0334661

УВЛЕЧЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ГРАНИЦЕЙ НАКЛОННОГО ЗАЗОРА

Голдобин Д.С., Райхер Ю.Л.

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

Запрос на решение задач гидродинамики плёнок магнитной жидкости (МЖ) продиктован развитием технологии использования этого материала в качестве контактной среды при ультразвуковом контроле. Действительно, при сканировании изделия дефектоскопом, датчик которого оснащён магнитной системой, последняя удерживает в зоне контакта (в зазоре) тонкий слой МЖ, поддерживая тем самым целостность акустического тракта. Сохранение сплошности этого жидкостного мостика в режиме сканирования принципиально важно для обеспечения стабильности процесса контроля.

Из-за того, что МЖ является смачивающей по отношению к обеим сторонам контакта, при движении датчика относительно изделия жидкость из зазора непрерывно расходуется: она уносится в виде плёнки, остающейся на просканированной поверхности. Поэтому для своей стабильной работы МЖ-контакт нуждается в постоянной подпитке для компенсации возникающей убыли. Очевидно, что скорость потери МЖ является важным технологическим параметром, который необходимо уметь оценивать при проектировании дефектоскопа с магнитной оснасткой.

Указанный расход зависит как от материальных параметров МЖ (вязкость, магнитная восприимчивость, поверхностное натяжение), так и от характеристик и размеров магнита, от толщины контактного зазора, скорости сканирования и т.д. Все эти величины входят в условия, конкретизирующие постановку задачи об истечении (расходе) МЖ из жидкостного мостика, удерживаемого в тонком зазоре полем постоянного магнита. В формальном плане, для решения этой гидродинамической задачи требуется провести полный анализ сугубо нелинейного дифференциального уравнения третьего порядка в частных производных, которое, к тому же, имеет сингулярности на обоих концах полубесконечного координатного интервала, на котором оно определено.

На предшествующем этапе проекта в работе [1] было получено исчерпывающее решение этой сложной (в плане математической физики) задачи для ситуации, где сканируемая поверхность располагалась строго горизонтально, см. Рис.1*а*. Показано, что задачу удобно решать в системе отсчёта, где магнит и датчик, на котором он закреплён, неподвижны и находятся вне зазора по одну его сторону. Сканируемая поверхность (другая граница зазора) движется с постоянной скоростью и уносит на себе плёнку МЖ.

В реальных условиях, однако, очевидным образом возникает необходимость контролировать не только горизонтальные, но и наклонные, а также криволинейные поверхности, то есть сканировать рельеф, при движении вдоль которого направление силы тяжести (в системе отсчёта датчика) может существенно отклоняться от вертикали.

Гравитация, определяемая вектором ускорения свободного падения $\boldsymbol{g}$, и градиентная магнитная сила $(\boldsymbol{M}\nabla)\boldsymbol{H}$, где $\boldsymbol{M}$ – намагниченность МЖ, а $\boldsymbol{H}$ – напряжённость внутреннего магнитного поля, это два главных фактора, которые определяют течение МЖ в плёнке. Изменение взаимного направления этих сил (при изменении наклона сканируемой поверхности) влечёт за собой изменение поля скорости в плёнке, а, значит, и величины расхода.

Именно эта задача была решена в течение отчётного этапа работы. Тем самым, обеспечена возможность оценивать количественно расход МЖ из жидкостного мостика (акустического контакта) при сканировании поверхностей с ориентацией в угловом интервале $|\beta| \leq 90°$ относительно горизонтали. Показано, что направление сканирования всегда должно выбираться так, чтобы в системе отсчёта, связанной с датчиком, контролируемая поверхность двигалась вверх; тогда сила тяжести будет возвращать уносимую МЖ обратно в контактное пятно. Это значит, что в системе отсчёта, связанной с изделием, датчик должен двигаться вниз вдоль наклонной поверхности. При этом расход МЖ оказывается меньше, чем при горизонтальном сканировании.

Сканирование наклонной поверхности в противоположном направлении имеет значительные ограничения по устойчивости, поскольку в этой конфигурации гравитация становится фактором, усиливающим тенденцию к вытеканию жидкости из контактного зазора.

Детальное изложение результатов решения задачи о наклонном сканировании представлено в работе [2]. Там же приведён иллюстративный расчёт для случая, когда МЖ-контакт удерживается на датчике шарообразным постоянным магнитом, намагниченность которого направлена нормально к плоскости зазора.

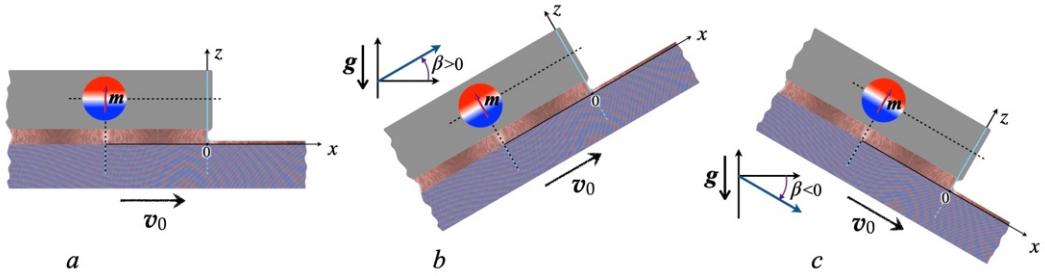


Рис. 1. – Схемы вариантов сканирования плоской поверхности с использованием акустического МЖ-контакта; (*a*) – случай, рассмотренный в работе [1], (*b*) – движение датчика вниз по поверхности изделия, (*c*) – движение вверх. В выполненном расчёте рассматривается только тот край контактного пятна, с которого уносится плёнка.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.4.3.

Литература

1. Goldobin D.S., Raikher Yu.L. Effect of magnetic field on the entrainment of magnetic fluid by a moving boundary of a plane slot // Physics of Fluids. 2026. Vol. 38. Art. no. 083109. https://doi.org/10.1063/5.0334661

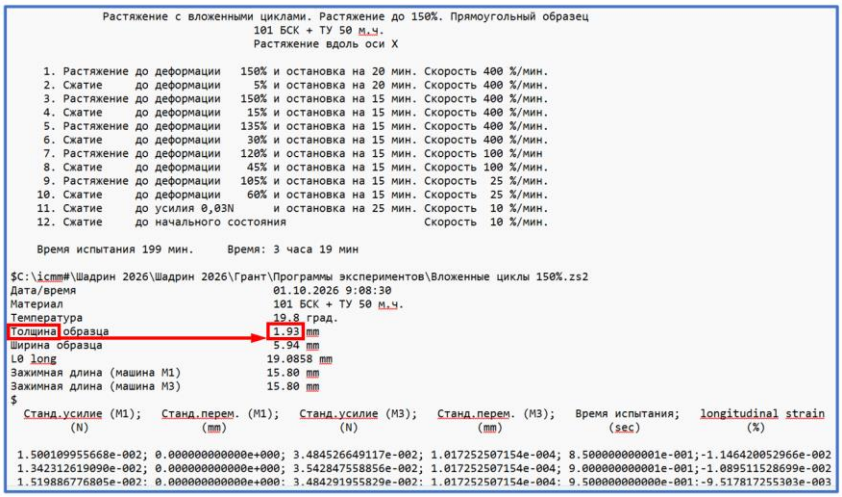
2. Goldobin D.S., Raikher Yu.L. Entrainment flow of magnetic fluid from an inclined plane slot // Microgravity Science and Technology. 2027. Submitted.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Свистков А.Л., Мохирева К.А.

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

Основным содержанием работ по проекту стал сравнительный анализ эластомерных нанокомпозитов с использованием разных связующих и разных видов наполнителей. В процессе выполнения проекта большое внимание было уделено возможности использования нового типа наполнителя. Технология его изготовления разработана в ФГУП «НИИСК». Это малослойные графены, полученные из биоматериалов с применением самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Кроме этого, проводились исследования материалов с гибридными наполнителями, созданными в ФГУП «НИИСК» с использованием СВС-технологии к смеси двух компонентов. Гибридные частицы наполнителя представляли собой графен, модифицированный техническим углеродом, и графен, модифицированный нанотрубками.



```
            Растяжение с вложенными циклами. Растяжение до 150%. Прямоугольный образец
                                  101 БСК + ТУ 50 м.ч.
                                  Растяжение вдоль оси X

    1. Растяжение до деформации   150% и остановка на 20 мин. Скорость 400 %/мин.
    2. Сжатие     до деформации     5% и остановка на 20 мин. Скорость 400 %/мин.
    3. Растяжение до деформации   150% и остановка на 15 мин. Скорость 400 %/мин.
    4. Сжатие     до деформации    15% и остановка на 15 мин. Скорость 400 %/мин.
    5. Растяжение до деформации   135% и остановка на 15 мин. Скорость 400 %/мин.
    6. Сжатие     до деформации    30% и остановка на 15 мин. Скорость 400 %/мин.
    7. Растяжение до деформации   120% и остановка на 15 мин. Скорость 100 %/мин
    8. Сжатие     до деформации    45% и остановка на 15 мин. Скорость 100 %/мин.
    9. Растяжение до деформации   105% и остановка на 15 мин. Скорость  25 %/мин.
   10. Сжатие     до деформации    60% и остановка на 15 мин. Скорость  25 %/мин.
   11. Сжатие     до усилия 0,03N      и остановка на 25 мин. Скорость  10 %/мин.
   12. Сжатие     до начального состояния                     Скорость  10 %/мин.

    Время испытания 199 мин.     Время: 3 часа 19 мин

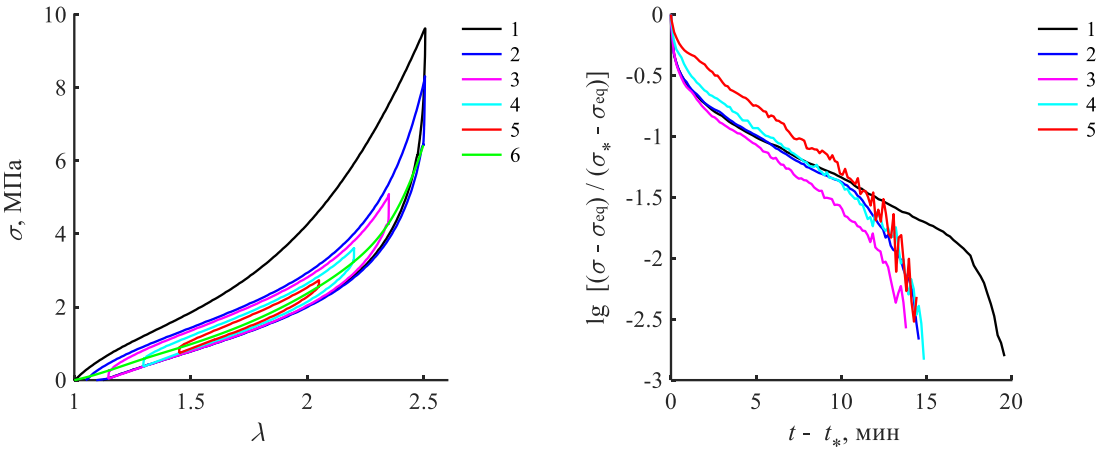
$C:\icmm#\Шадрин 2026\Шадрин 2026\Грант\Программы экспериментов\Вложенные циклы 150%.zs2
Дата/время                          01.10.2026 9:08:30
Материал                            101 БСК + ТУ 50 м.ч.
Температура                         19.8 град.
Толщина образца                     1.93 mm
Ширина образца                      5.94 mm
L0 long                             19.0858 mm
Зажимная длина (машина M1)          15.80 mm
Зажимная длина (машина M3)          15.80 mm
$
  Станд.усилие (M1);   Станд.перем. (M1);   Станд.усилие (M3);   Станд.перем. (M3);   Время испытания;   longitudinal strain
          (N)                 (mm)                (N)                 (mm)                (sec)                (%)

 1.500109955668e-002; 0.000000000000e+000; 3.484526649117e-002; 1.017252507154e-004; 8.500000000001e-001;-1.146420052966e-002
 1.342312619090e-002; 0.000000000000e+000; 3.542847558856e-002; 1.017252507154e-004; 9.000000000001e-001;-1.089511528699e-002
 1.519886776805e-002; 0.000000000000e+000; 3.484291955829e-002; 1.017252507154e-004; 9.500000000000e-001:-9.517817255303e-003
```

Рис. 1. – Пример внешнего вида содержания файлов хранимой информации в базе данных экспериментальных исследований

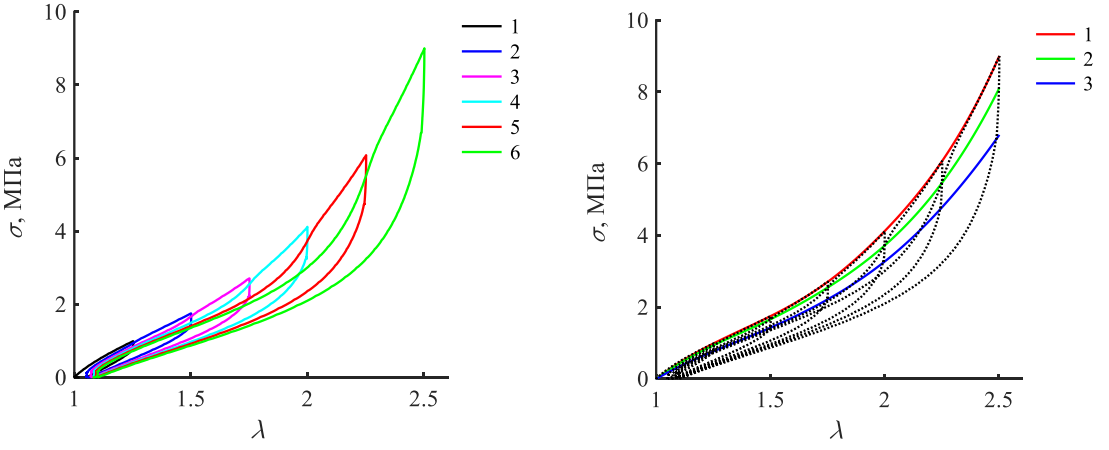
Для получения полной картины механического поведения материалов все эксперименты проводились в режиме сравнительного анализа. Материалами сравнения стали нанокомпозиты с известными и хорошо зарекомендовавшими себя углеродными наполнителями. Создана база результатов экспериментальных исследований. Она представляет собой подробное описание условий проведения экспериментов и массив полученных данных. Изложение сделано в удобном для чтения текстовом формате (рис. 1). Создана специальная программа для преобразования разных по содержанию текстовых файлов в данные, необходимые

для расчетов. Работает программа путем поиска по ключевому слову соответствующей строки и столбца. После этого осуществляется сдвиг на нужное число записей в этой строке и, при необходимости, сдвиг на дополнительное число строк. Осуществляется считывание искомых значений. Далее происходит подготовка данных для системы MATLAB по правилам этого программного продукта. В результате значительно экономится время подготовки данных для последующих программ анализа и исключаются ошибки.



(а) (б)

Рис. 2. – Эксперимент со вложенными циклами. Зависимость напряжений от кратности удлинения (а) и зависимость напряжений от времени в процессе релаксации напряжений. Время отсчитывается от момента остановки захватов при максимальной кратности удлинения на данном цикле (б). Цифрами от 1 до 5 отмечены номера циклов. Цифрой 6 отмечена равновесная кривая, полученная сплайном по ключевым точкам



(а) (б)

Рис. 3. – Эксперимент с нарастающей амплитудой циклов деформирования. Зависимость напряжений от кратности удлинения с первого по шестой циклы (а) и те же данные с вычисленными по сплайнам кривыми (б), соединяющими точки при максимальных значениях деформаций на цикле для неразмягченного материала (1), размягченного материала (2), размягченного материала при равновесном деформировании (3)

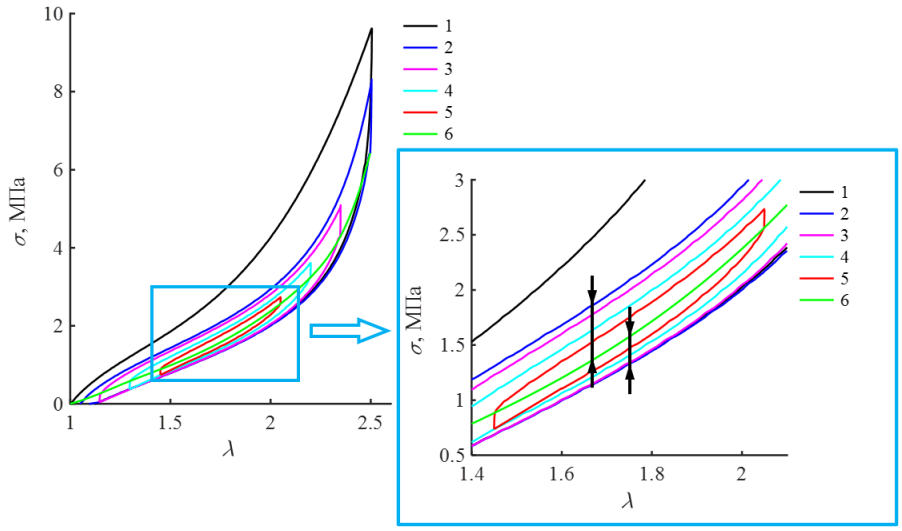


Рис. 4. – Зависимость напряжений от кратности удлинения в эксперименте со вложенными циклами. Цифрами от 1 до 5 указаны номера циклов. Цифрой 6 отмечена равновесная кривая. Стрелками отмечены диссипативные напряжения в установившихся режимах при растяжении образца и при снятии нагрузки

Механические эксперименты выполнялись по разработанным ранее и запатентованным методиками [1, 2]. Для анализа данных созданы специальные программы [3, 4]. С целью упрощения дальнейшей работы, нужная информация по каждому циклу, формируется в отдельные массивы, которые удобно сохранять в файлы данных. Сохраненные файлы могут быть использованы для анализа механических свойств по программам, которые может создать исследователь под свои научные интересы. В частности, это может быть анализ равновесного поведения (кривая 6 на рис. 2, а), диссипативные составляющие тензора напряжений Коши в размягченном материале при растяжении и при разгрузки на участке с установившейся диссипацией (рис. 4), размягчение диссипативной части тензора напряжений Коши (рис. 3, б) и т.д.

Конкретные результаты экспериментальных исследований представлены в специальном докладе.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.5.1.

Литература

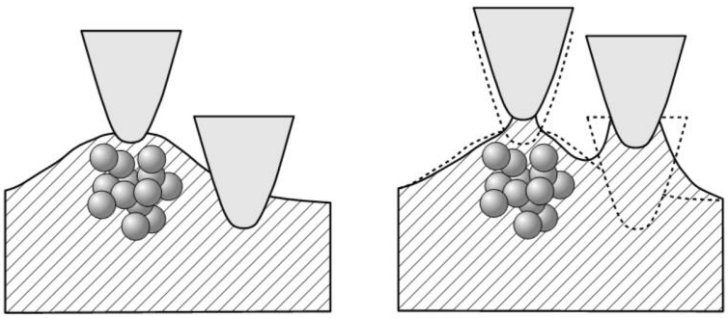
1. Свистков А.Л., Шадрин В.В. Способ одноосного циклического испытания материала. Патент на изобретение № 2549841. 2015
2. Шадрин В.В., Свистков А.Л. Способ циклического испытания полимерных материалов. Патент на изобретение № 2758100. 2021
3. Мохирева К.А., Свистков А.Л. Анализ вязкоупругих свойств эластомерных композитов при одноосных циклических нагружениях с линейно возрастающей амплитудой. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026688324. 2026
4. Мохирева К.А., Свистков А.Л. Анализ вязкоупругих свойств эластомерных композитов при одноосных испытаниях со вложенными циклами деформирования. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026688325. 2026

АНАЛИЗ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ НАНОКОМПОЗИТОВ И ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Свистков А.Л., Изюмов Р.И.

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

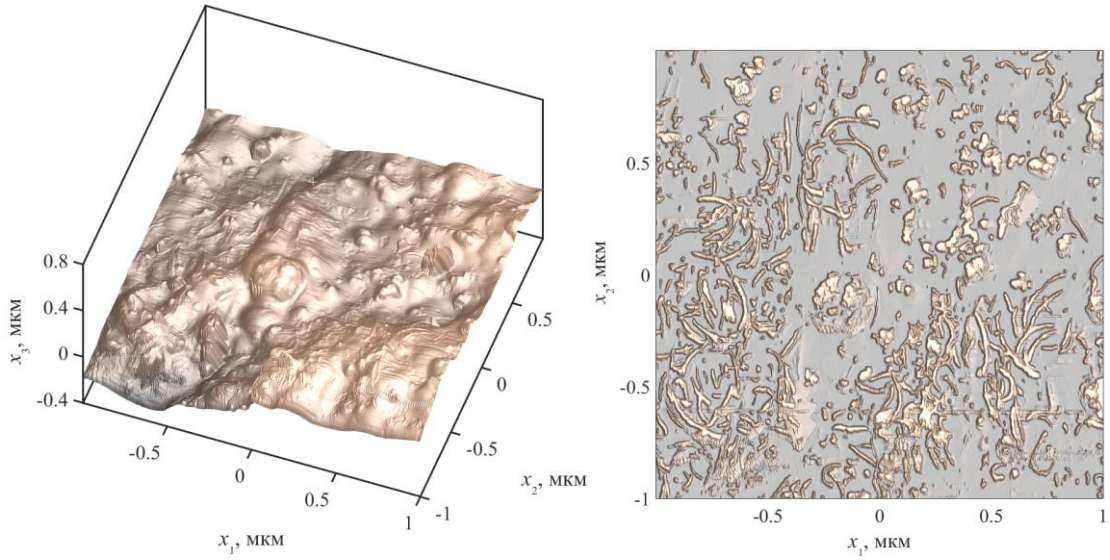
Для понимания причин появления особенностей механического поведения эластомерных нанокомпозитов необходимо в первую очередь выяснить особенности структуры материалов. Ранее, при выполнении госбюджетной темы, мы обратили внимание, что прорастание макроразрыва из надреза на образце происходит по-разному в эластомере с разными видами наполнителей. Это видно по значению разрывного удлинения материала и по особенностям ветвления макроразрыва при его росте. Поэтому большое внимание в работе по проекту было уделено атомно-силовым исследованиям структуры материалов, определяющей размягчение, вязкоупругое поведение, момент появления и скорость прорастания макроразрыва.



(а) (б)

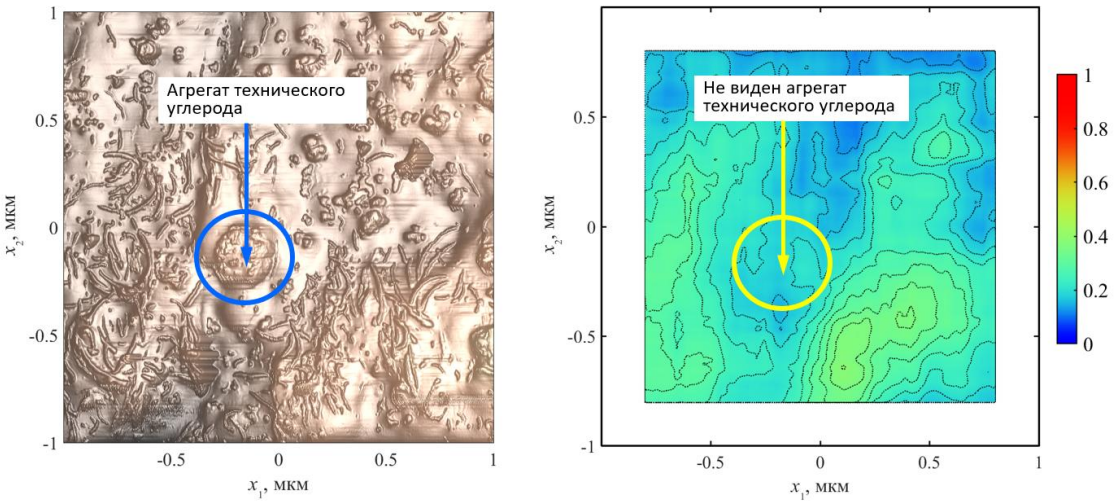
Рис. 1. – Иллюстрации глубины погружения зонда в материал во время его скачка на прямом ходе (а), и количества налипшего на зонд эластомера на обратном ходе (б). В результате отличий в полях напряжений на прямом и обратном ходе появляются диссипативные потери, зависящие от наличия жестких включений под поверхностью образца

Особенностью эластомерных нанокомпозитов является то, что включения всегда закрыты тонким слоем связующего. Это результат активного взаимодействия связующего с наполнителем. Нами предложена новая методика обнаружения включений, которые располагаются на небольшой глубине под поверхностью образца [1, 2]. В основе ее лежит зависимость диссипативных потерь от присутствия включений под поверхностью образца (рис. 1). Это означает, что полученную в полуконтактном режиме работы АСМ карту фазового угла, можно использовать для выявления включений (рис. 2). Практическое применение методики показало, что она эффективна только для обнаружения включений или фрагмента частиц, которые находятся на небольшой глубине (рис. 3). Для вычисления карты распределения объемной доли наполнителя нами предложено использовать интегральный оператор перехода к заданному масштабному уровню, который имел следующий вид:



(а) (б)

Рис. 2. – Исходная поверхность образца нанокомпозита на основе бутадиен-нитрильного каучука, технического углерода и многостенных нанотрубок (а). На рисунке (б) представлена, определенная по новой методике, построенной на основе анализа диссипативных потерь, карта расположения частиц наполнителя в подповерхностном слое образца (б)



(а) (б)

Рис. 3. – С помощью компьютерной обработки эластомер в подповерхностном слое «сделан прозрачным» (а). В результате стали хорошо видны нанотрубки в подповерхностном слое. На рисунке (б) показана, определенная по найденным объектам, карта распределения объемной плотности наполнителя на масштабном уровне R=200 нм (б). Использована методика выделения объектов на основе анализа диссипативных потерь

$$\varphi(x_1, x_2) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{h(x_1^*, x_2^*)}{h_{\max}} \, r \cos\theta \; d\theta \; dr,$$

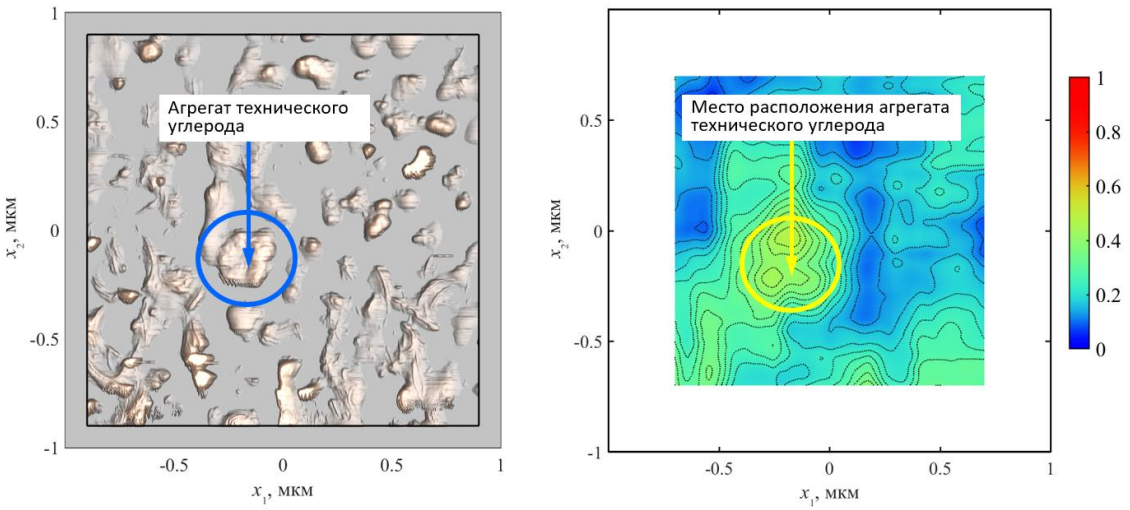
где координаты связаны равенствами $x_1^* = x_1 + r\cos\theta$, $x_2^* = x_2 + r\sin\theta$. Функция $h = h(x_1^*, x_2^*)$ представляет собой высоту включений над новой поверхностью связующего, которая появилась после удаления эластомера (вычислительный эксперимент) из образца на толщину подповерхностного слоя. Если в данном месте нет включения, то $h = 0$.

По методике анализа диссипативных потерь можно обнаружить нанотрубки. Для выявления агрегатов частиц технического углерода, которые находятся глубже в материале и занимают существенно большие объемы в композите, целесообразно использовать методику, основанную на анализе геометрии образца (рис. 4). Выравнивание поверхности осуществляется с помощью интегрального оператора

$$z_{\text{new}}(x_1, x_2) = z(x_1, x_2) - \frac{1}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} z(x_1^*, x_2^*)\, r \cos\theta \; d\theta \, dr$$

где параметр R_s определяет окрестность точки, используемую для выравнивания. После этого отбрасывается часть материала с отрицательными высотами. Объекты, формирующие неровности на границе образца, становятся видимыми (рис. 4).

Нанокомпозиты с нанотрубками имеют самый яркий эффект усиления. Исследования показали, что нанотрубки образуют скопления микронных размеров. В областях их расположения имеет место высокое среднее квадратичное отклонение высот поверхности. Это результат ветвления макроразрыва при его росте. Наличие таких скоплений затрудняет прорастание дефектов, влияет на прочность, характер разрушения и определяет эффект размягчения материала.



(а) (б)

Рис. 4. – Расположение частиц наполнителя, полученное по методике анализа геометрии поверхности образца (а). На изображении не видно нанотрубок. На рисунке (б) показана карта распределения объемной плотности наполнителя на масштабном уровне R=200 нм (б)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.5.2.

Литература

1. Свистков А.Л., Изюмов Р.И. Способ определения структуры подповерхностного слоя нанокомпозита с мягким связующим и твердым наполнителем. Патент на изобретение № 2860709. 2026.

2. Izyumov R.I., Svistkov A.L. Theoretical basis and experimental application of the dissipative properties analysis method for mapping particle distribution in the subsurface layer of elastomeric nanocomposites // Int. J. Solids Struct. 2026. Vol. 341. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2026.114298

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Свистков А.Л., Мохирева К.А., Беляев А.Ю.

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

Проведены исследования механического поведения эластомерных материалов на основе бутадиен-стирольного, бутадиен-нитрильного (полярного) и изопренового (кристаллизующегося) каучуков. В качестве наполнителей были использованы: технический углерод, многостенные нанотрубки, малослойные графены из крахмала и целлюлозы (полученные по разработанной в ФГУП «НИИСК» технологии на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза), СВС-гибридные наполнители (модифицированные графены в ФГУП «НИИСК» техническим углеродом или многостенными нанотрубками).

На рисунке 1 показан хорошо известный факт использования технического углерода для улучшения механических свойств эластомерного материала. Технология изготовления технического углерода имеет ряд недостатков: невысокий выход целевого продукта, экологические риски (в процессе производства в атмосферу попадает целый ряд вредных веществ), сложности с улавливанием продукта, высокие энергозатраты (требуется температура выше 1000°С), проблемы с сырьем. Использование других углеродных нанонаполнителей (классических плоских графенов, нанотрубок, детонационных алмазов) ограничено их высокой ценой и сложностью изготовления.

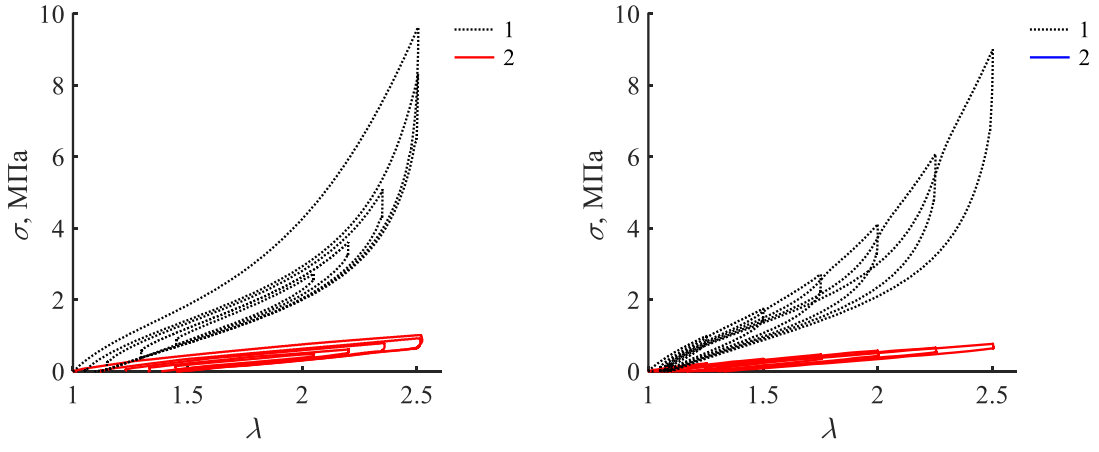


Рис. 1. – Зависимость напряжений от кратностей удлинений в эксперименте со вложенными циклами (а) и в эксперименте с нарастающей амплитудой (б). Цифрами отмечены: 1 – эластомер, наполненный техническим углеродом, 2 – эластомер без наполнителя

На приведенных рисунках показаны результаты экспериментальных исследований по методикам со вложенными циклами (с разными скоростями

движения захватов на разных циклах) и с нарастающими циклами деформирования. При смене направления движения захватов осуществлялись продолжительные остановки.

Результатом проведенных исследований стало заключение о том, малослойные графены, созданные по СВС технологии, могут служить заменой используемых сейчас наполнителей (рисунки 2 и 3). Преимуществами новых наполнителей является: низкое энергопотребление производства, простота и компактность оборудования, высокая производительность, высокая чистота продукта, экологичность, использование дешевого воспроизводимого сырья.

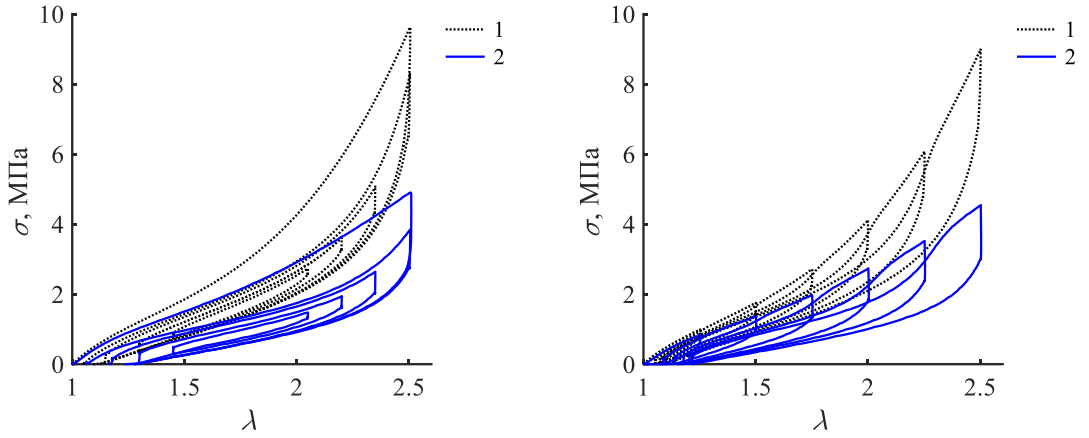


Рис. 2. – Зависимость напряжений от кратностей удлинений в эксперименте со вложенными циклами (а) и в эксперименте с нарастающей амплитудой (б). Наполнителями эластомера являются: 1 – технический углерод, 2 – малослойный графен, полученный из целлюлозы

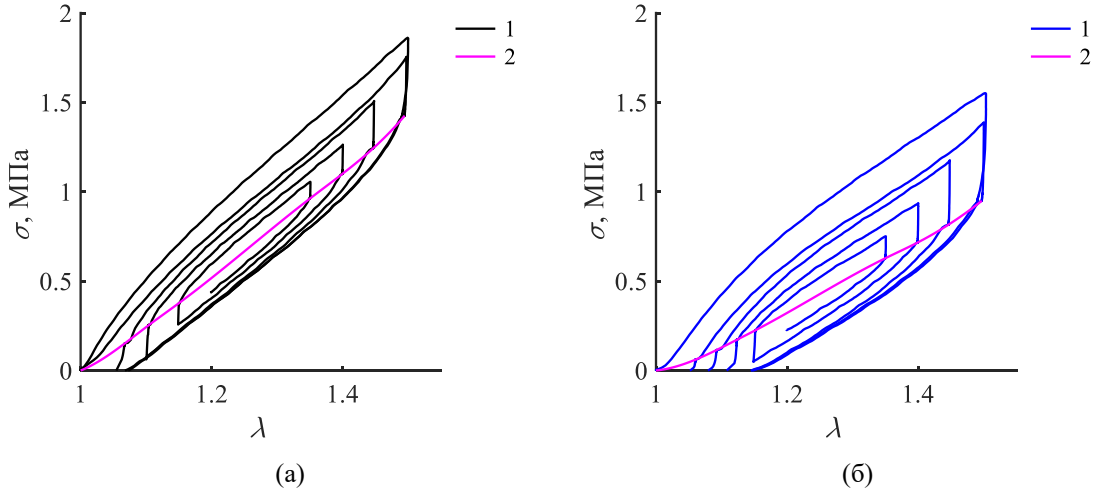


Рис. 3. – Зависимость напряжений от кратностей удлинений в эксперименте со вложенными циклами. Наполнителями эластомера являются: а – технический углерод, б – малослойный графен, полученный из целлюлозы. Цифрой 1 отмечены экспериментальные кривые. Фиолетовыми линиями, отмеченные цифрой 2, показаны равновесные кривые, полученные сплайн-аппроксимацией по ключевым точкам

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.5.3.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ РЕБРА НА ПЛАСТИНЕ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ И ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ

Келлер И.Э.*, Салихова Н.К.*, Дудин Д.С.
«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Исследована эволюция прогиба пластины при послойном возведении на ней ребра проволочно-дуговой наплавкой — простейшей базовой конструкции для изучения искажения геометрии оребрённых панелей при их аддитивном производстве, для которой отсутствуют теоретические результаты, позволяющие понимать механику процесса наращиваемого тела.

На закрепленной на основании металлической пластине 09Г2С дуговой наплавкой проволоки Inconel 625 были возведены стенки длиной 180 и высотой 15 мм (рис. 1), состоящие из 12 слоев, с применением двух технологических режимов:

Режим	Сила тока, А	Скорость подачи проволоки, м/мин	Скорость наплавки, мм/с	Пауза, с
А	200	6,5	10	10
Б	160	9,5	15	10

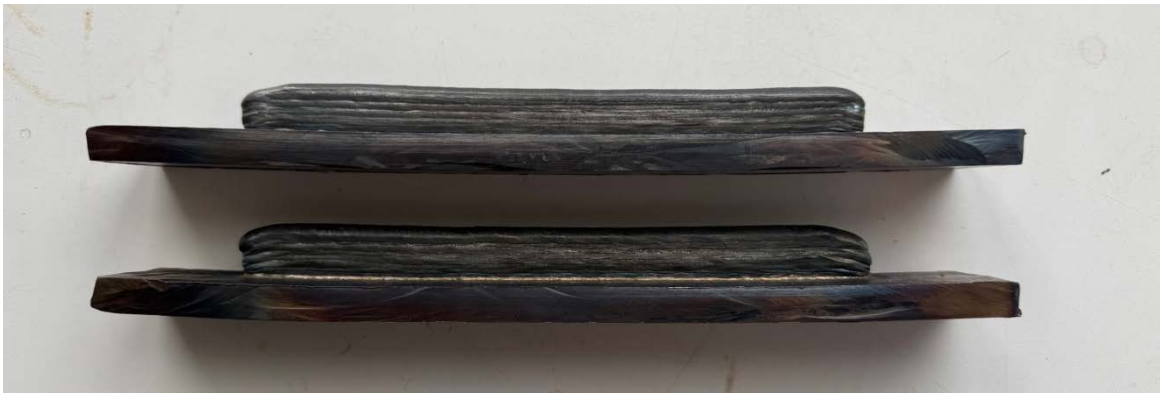


Рис. 1. – Образцы «Ребро на основании», наплавленные проволокой Inconel 625 с применением технологических режимов А (верхний) и Б (нижний).

Далее способом [1] определялось распределение собственных деформаций по высоте стенки, для чего на электроэрозионном станке последовательно срезались слои толщиной 1 мм, для которых измерялся прогиб (рис. 2). Даже до реконструкции собственных деформаций видно, что полосы в обеих стопках практически плоскопараллельны, а их прогибы, пропорциональные градиенту собственных деформаций, весьма небольшие. Это говорит о том, что оба технологических режима имеют оптимальные параметры.

Построена численная модель, включающая последовательно решаемые несвязанные задачи теплопроводности в наращиваемой конструкции, термоупругопластичности с учетом истории изменения температуры в ней и ее упругопластического изгиба при охлаждении до температуры окружающей среды и освобождении пластины от закрепления к горизонтальному основанию.



Рис. 2. – Образцы А (верхний) и Б (нижний) после послойного разрезания

Данная несвязанная модель соответствует гипотезам, принятым в теории сварочных напряжений [2,3]. Расчет верифицирован по величине продольного прогиба конструкции и распределению продольных остаточных напряжений по высоте ребра. На рис. 3 приведены распределения по длине стенки температуры и напряжений.

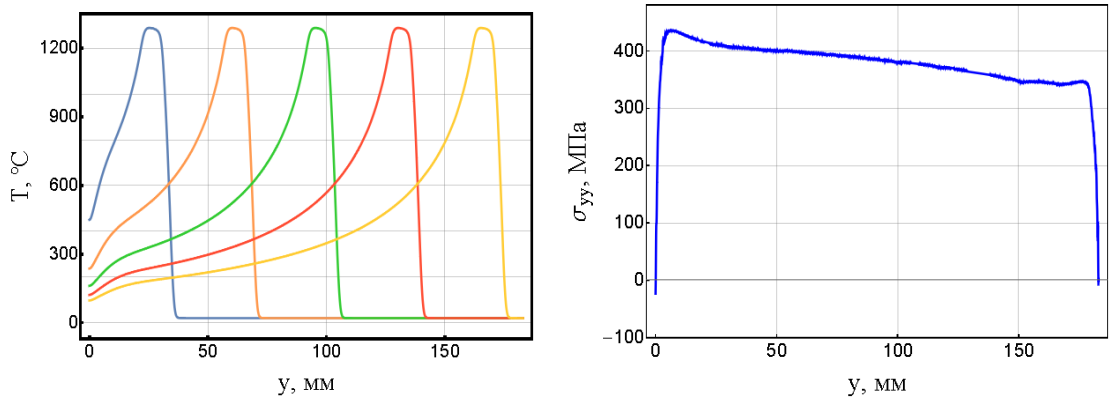


Рис. 3. – Распределения по длине стенки а) температуры в последовательные моменты времени, б) продольной компоненты напряжений

Для понимания механизма эволюции изгиба пластины при послойном возведении на ней ребра ранее была сформулирована инженерная балочно-стержневая модель, с помощью которой в зависимости от параметров технологического процесса может наблюдаться немонотонное изменение продольного изгиба конструкции в процессе послойного наращивания ребра, которое объясняется конкуренцией роста жесткости конструкции при наплавке

слоев и сжимающих собственных деформаций при охлаждении слоев [4]. Такое поведение трудоёмко подтвердить экспериментально, но его необходимо учитывать при выборе технологических параметров возведения оребрённых конструкций с управлением скоростью наплавки, выдержками или послойной точечной обработкой давлением.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.6.1.

Литература

1. Келлер И.Э., Петухов Д.С., Дудин Д.С., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н. Способ определения остаточных напряжений в ребре на жестком основании // Патент на изобретение № 2797771 от 08.06.2023.
2. Окерблом Н.О. Сварочные деформации и напряжения. М.-Л.: Машгиз, 1948. 253 с.
3. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1984. 279 с.
4. Dudin D.S., Keller I.E., Permyakov G.L., Trushnikov D.N. Modelling of residual stresses and distortions of the wall on a substrate built by wire-arc surfacing. Journal of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics. 2024. Т. 17. № 1. С. 75-90.

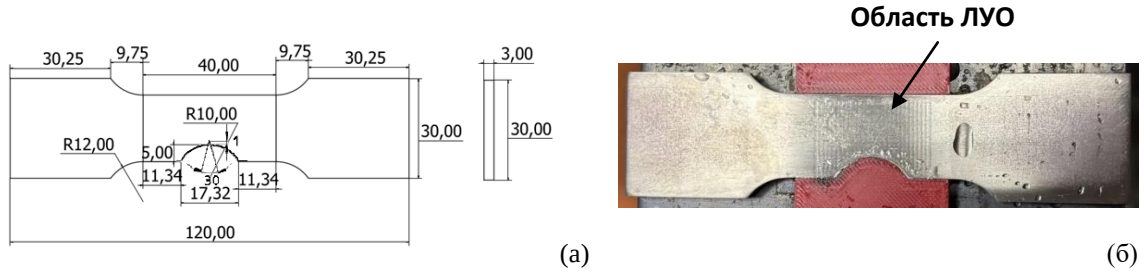
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКИ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА, СОЗДАННОГО ТЕХНОЛОГИЕЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Сабиров Р.Р., Угольников М.В., Ложкин Д.В.

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

Аддитивные технологии изготовления титановых деталей позволяют снизить расход материала и получать изделия сложной геометрии. Вместе с тем термические циклы послойного формирования сопровождаются возникновением неоднородных полей остаточных напряжений, а особенности структуры и дефекты изготовления могут ограничивать усталостную долговечность [1]. Лазерная ударная обработка (ЛУО) является методом поверхностного упрочнения, основанным на воздействии ударных волн, генерируемых импульсным лазерным излучением. Пластическая деформация приповерхностного слоя и его взаимодействие с упруго деформированным объемом материала при разгрузке приводят к формированию сжимающих остаточных напряжений [2]. Их создание в зонах концентрации напряжений способно снизить локальные растягивающие напряжения при нагружении и затруднить зарождение и развитие усталостных трещин. Для аддитивно изготовленного Ti-6Al-4V показана возможность повышения долговечности после ЛУО [3], однако результат зависит от дефектности материала, состояния поверхности и режима обработки [4]. Для образцов из листового Ti-6Al-4V с вырезом показано, что ЛУО зоны концентратора повышает усталостную долговечность в большей степени, чем обработка только прилегающих плоских поверхностей [5]. Однако при гигацикловых испытаниях образцов Ti-6Al-4V из горячекатаного прутка после ЛУО без защитного покрытия выявлено снижение усталостной прочности, которое связывается с уравновешивающими растягивающими остаточными напряжениями в объеме материала [6]. Поэтому эффективность ЛУО необходимо оценивать с учетом геометрии образца, распределения остаточных напряжений и режима нагружения. Цель работы – исследовать влияние локальной ЛУО на усталостную долговечность образцов с круглым вырезом, изготовленных с помощью аддитивной технологии из проволоки титанового сплава ВТ6.

Образцы вырезали из листовой заготовки, полученной аддитивным методом, с ориентацией продольной оси вдоль направления выращивания. Обработке подвергали торцевую поверхность круглого выреза и прилегающие области поверхности образца при плотности мощности лазерного излучения 10 ГВт/см². Геометрия образца и расположение зоны ЛУО приведены на рис. 1. Остаточные напряжения после обработки определяли методом сверления отверстия в соответствии с ASTM E837 [7]. Полученный профиль остаточных напряжений по глубине представлен на рис. 2.



(а) (б)

Рис. 1. – Геометрия образцов из титанового сплава ВТ6, изготовленных аддитивным методом (*а*); фото образца после ЛУО *(б)*

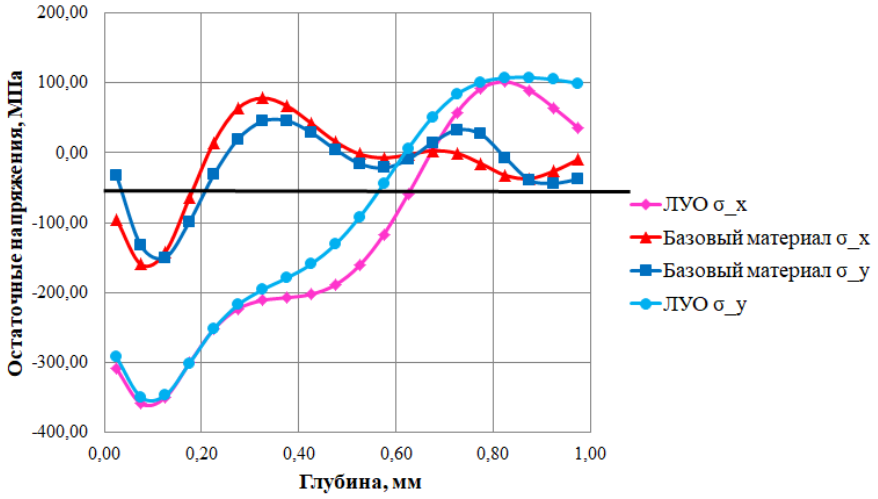


Рис. 2. – Зависимость компонентов остаточных напряжений σ_x и σ_y от глубины сверления отверстия в базовом материале и в области ЛУО

Усталостные испытания проводились при максимальной силе в цикле Fmax = 4 кН и коэффициенте асимметрии цикла R = Fmin/Fmax = 0,1. Исследовали два образца без обработки и три образца после ЛУО. Долговечность оценивали по числу циклов до разрушения. Средняя усталостная долговечность образцов без ЛУО составила $2{,}92 \cdot 10^5$ циклов, после обработки – $3{,}49 \cdot 10^5$ циклов, что соответствует увеличению приблизительно на 19 % (рис. 3).

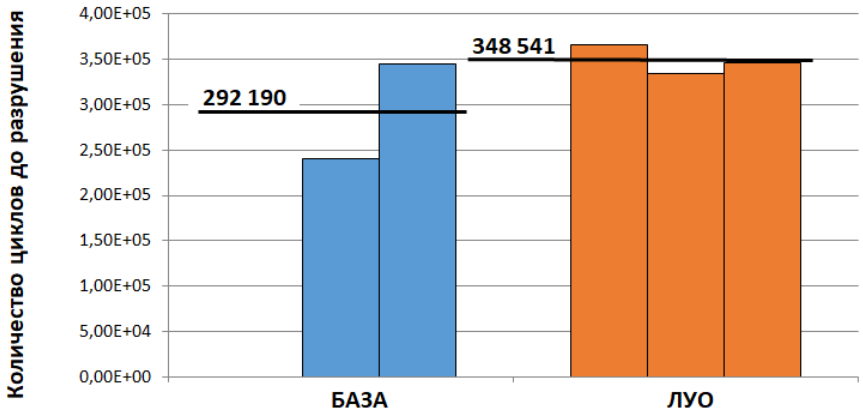


Рис. 3. – Диаграмма усталостной долговечности базовых образцов и образцов после ЛУО

В обработанной серии наблюдался меньший разброс результатов. Полученные данные указывают на тенденцию к повышению долговечности при выбранном режиме ЛУО. При этом ограниченное число испытаний и перекрытие диапазонов долговечности двух серий требуют расширения экспериментальной выборки для оценки статистической значимости эффекта.

Таким образом, в исследованной серии локальная ЛУО области круглого выреза сопровождалась увеличением средней усталостной долговечности аддитивно изготовленного сплава ВТ6. Одним из возможных механизмов этого изменения является формирование благоприятного поля остаточных напряжений в зоне концентратора; количественное определение его вклада требует сопоставления профилей напряжений с характеристиками зарождения и роста трещин. Практическая значимость работы заключается в получении экспериментальных данных для выбора режимов и областей упрочнения деталей, изготовленных из титановой проволоки аддитивными методами. Развитие такого подхода может способствовать повышению ресурса ответственных элементов авиационного и энергетического оборудования. Для обоснования промышленного применения необходимы проверка воспроизводимости эффекта при различных уровнях циклической нагрузки и оценка возможного влияния уравновешивающих растягивающих остаточных напряжений.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.6.2.

Литература

1. Ahmad B., Zhang X., Guo H., Fitzpatrick M.E., Neto L.M.S.C., Williams S. Influence of deposition strategies on residual stress in wire + arc additive manufactured titanium Ti-6Al-4V // Metals. 2022. Vol. 12. No. 2. Art. 253. https://doi.org/10.3390/met12020253
2. Guo W., Sun R., Song B., Zhu Y., Li F., Che Z., Li B., Guo C., Liu L., Peng P. Laser shock peening of laser additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 349. P. 503–510. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.020
3. Aguado-Montero S., Navarro C., Vázquez J., Lasagni F., Slawik S., Domínguez J. Fatigue behaviour of PBF additive manufactured TI6AL4V alloy after shot and laser peening // International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 154. Art. 106536. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106536
4. Jiang Q., Li S., Zhou C., Zhang B., Zhang Y. Effects of laser shock peening on the ultra-high cycle fatigue performance of additively manufactured Ti6Al4V alloy // Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 144. Art. 107391. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107391
5. Bartolomei M., Iziumova A., Vshivkov A., Gachegova E., Plekhov O., Davydov D. Residual stress field investigation of notched TC4 specimens after laser shock peening // Engineering Fracture Mechanics. 2026. Vol. 340. Art. 112155. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2026.112155
6. Sabirov R., Vshivkov A., Kudryashev I., Shaysultanov D., Zherebtsov S., Plekhov O. The influence of laser shock peening on the behavior of Ti6Al4V titanium alloy under gigacycle fatigue conditions // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2026. Vol. 49. No. 2. P. 546–558. https://doi.org/10.1111/ffe.70143
7. ASTM E837-25e1. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. West Conshohocken: ASTM International. 2026. 17 p. https://doi.org/10.1520/E0837-25E01

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКИ НА КОРРОЗИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА, СОЗДАННОГО ТЕХНОЛОГИЕЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Пантелеев И.А., Бартоломей М.Л., Вережак М.В., Кудряшев И.С., Гачегова Е.А.

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

Развитие аддитивных технологий изготовления деталей из титановых сплавов позволяет повысить эффективность использования материала и расширить возможности получения изделий сложной геометрии. Вместе с тем термические циклы послойного формирования определяют особенности структуры и поля остаточных напряжений, влияющие на эксплуатационные свойства изделий [1]. Одним из перспективных способов поверхностного упрочнения является лазерная ударная обработка (ЛУО), основанная на воздействии ударных волн, генерируемых импульсным лазерным излучением. Распространение слабой ударной волны вызывает пластическую деформацию приповерхностного слоя; его взаимодействие с упруго деформированным объемом материала при разгрузке приводит к формированию сжимающих остаточных напряжений [2]. Такое воздействие создает предпосылки для повышения сопротивления усталостному разрушению [3], однако его влияние на коррозионную стойкость требует самостоятельного исследования [4]. Научная задача состоит в оценке коррозионного поведения материала после ЛУО и устойчивости сформированного поля остаточных напряжений в агрессивной среде. Цель работы – экспериментально исследовать влияние ЛУО на изменение массы при коррозии и сохранение сжимающих остаточных напряжений в образцах, изготовленных с помощью аддитивной технологии из проволоки титанового сплава ВТ6.

Исследования выполнены на пяти пластинах размером 25×25×3 мм, прошедших механическую обработку до заданных размеров. Для гравиметрической оценки коррозионной стойкости использовали две пластины без ЛУО и две пластины после обработки. Пятая пластина предназначалась для определения профилей остаточных напряжений. ЛУО проводили в один проход при плотности мощности лазерного излучения 10 ГВт/см² на всех поверхностях, включая торцы. Остаточные напряжения определяли методом сверления отверстия в соответствии с ASTM E837 [5] до глубины 1 мм. Измерения выполняли последовательно до ЛУО, после обработки и после коррозионного воздействия в отдельных областях одной и той же поверхности пластины. Анализировали величину сжимающих остаточных напряжений и характер их распределения по глубине (рис. 1).

Коррозионные испытания всех пластин проводили путем погружения в 10%-ный раствор HCl на 48 ч при температуре 60 °C. Взвешивание выполняли до (m_0) и после (m_{48}) коррозионного воздействия. Изменение массы определяли как $\Delta m = m_{48} - m_0$ (табл. 1).

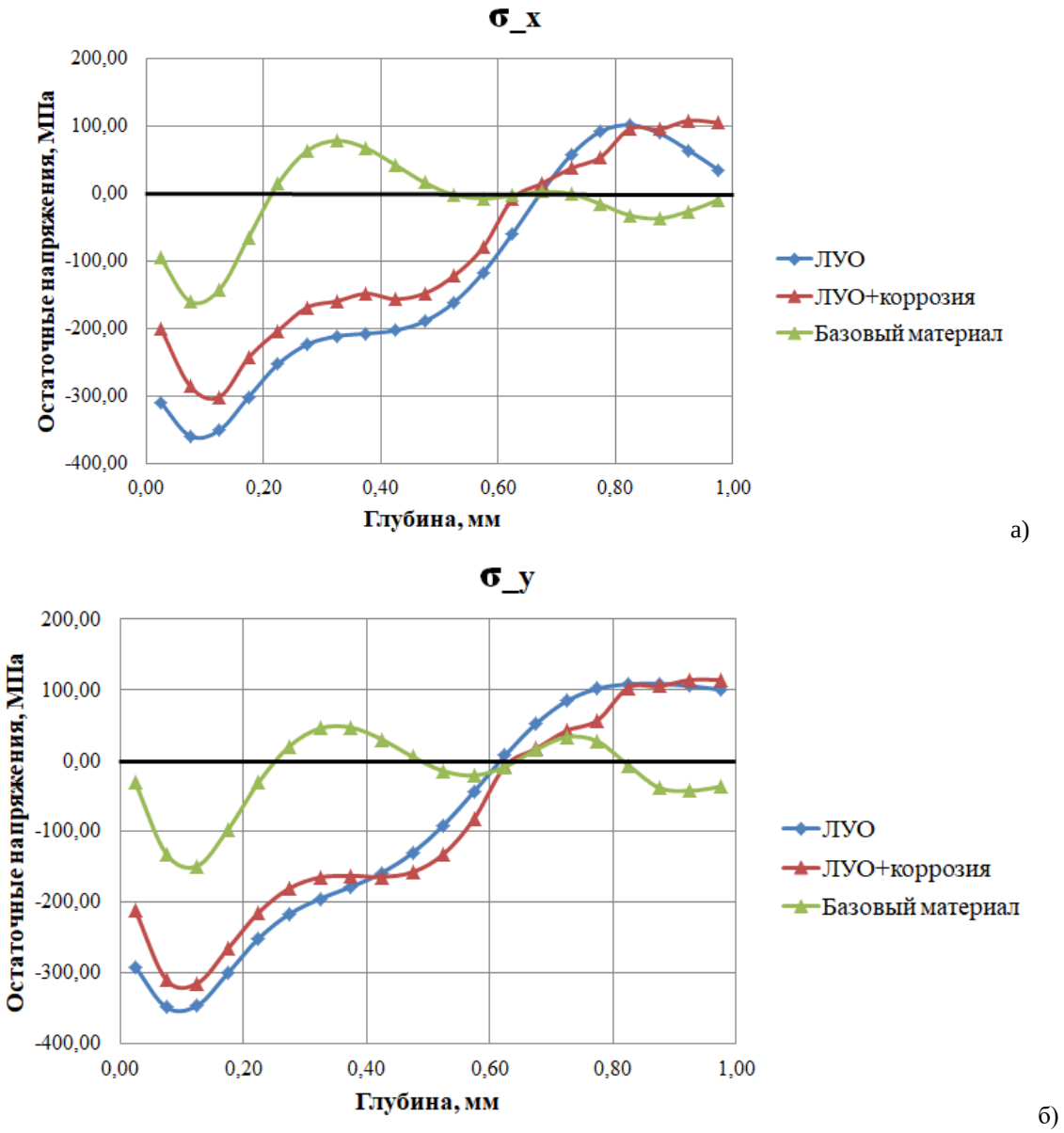


Рис. 1. - Профили компонентов σ_x (а) и σ_y (б) остаточных напряжений по глубине на базовом материале и после различных типов воздействия на образец: ЛУО и ЛУО+коррозия

Таблица 1. Изменение массы образцов после 48 ч воздействия 10% раствора соляной кислоты (HCl) при температуре 60°C

Образец	m_0, г	m_{48}, г	Δm, г
Без ЛУО_1	10,01345	9,73647	0,27698
Без ЛУО_2	10,29647	10,03950	0,25697
После ЛУО_1	10,50594	10,25155	0,25439
После ЛУО_2	10,13010	9,86491	0,26519

По результатам взвешивания различия в изменении массы образцов без ЛУО и после обработки оказались незначительными. Сопоставление профилей остаточных напряжений до и после коррозионных испытаний показало, что

сформированное ЛУО поле сжимающих остаточных напряжений практически сохранилось как по величине, так и по характеру распределения в исследованном слое глубиной до 1 мм (рис. 1).

Таким образом, для исследованных образцов из сплава ВТ6, изготовленных с помощью аддитивной технологии, заметного влияния ЛУО на коррозионную стойкость по гравиметрическому критерию не выявлено. Вместе с тем сохранение величины и глубинного распределения сжимающих остаточных напряжений свидетельствует об устойчивости сформированного поля к воздействию солянокислой среды в заданных условиях. Устойчивость поля остаточных напряжений характеризует сохранение одного из основных результатов ЛУО и может использоваться как критерий выбора режимов финишного упрочнения аддитивно изготовленных титановых деталей. Полученные данные создают экспериментальную основу для дальнейшего исследования сопротивления зарождению и развитию усталостных трещин при совместном действии циклической нагрузки и агрессивной среды. Такие исследования необходимы для оценки применимости ЛУО к деталям авиационного и энергетического оборудования, для которых существенны одновременно коррозионная стойкость и усталостная долговечность.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.6.2.

Литература

1. Ahmad B., Zhang X., Guo H., Fitzpatrick M.E., Neto L.M.S.C., Williams S. Influence of deposition strategies on residual stress in wire + arc additive manufactured titanium Ti-6Al-4V // Metals. 2022. Vol. 12. No. 2. Art. 253. https://doi.org/10.3390/met12020253
2. Guo W., Sun R., Song B., Zhu Y., Li F., Che Z., Li B., Guo C., Liu L., Peng P. Laser shock peening of laser additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 349. P. 503–510. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.020
3. Aguado-Montero S., Navarro C., Vázquez J., Lasagni F., Slawik S., Domínguez J. Fatigue behaviour of PBF additive manufactured TI6AL4V alloy after shot and laser peening // International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 154. Art. 106536. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106536
4. Lee J., Kaufman J., Divoký M., Mocek T., Brajer J., Jang H. Effect of laser shock peening on the passivation behavior of subtractively and additively manufactured Ti–6Al–4V alloys in pH 2 buffer solution // Materials. 2026. Vol. 19. No. 7. Art. 1432. https://doi.org/10.3390/ma19071432
5. ASTM E837-25e1. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. West Conshohocken: ASTM International. 2026. 17 p. https://doi.org/10.1520/E0837-25E01

ИЗУЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ МДО ПОКРЫТИЙ ПРИ ФРИКЦИОННОМ НАГРУЖЕНИИ.

Торская Е.В., Хади А.А., Степанов Ф.И., 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

Алюминий и его сплавы находят широкое применение, особенно в авиации, транспортной отрасли и судостроении, что обусловлено их доступностью и высоким отношением прочности к массе: плотность алюминия примерно на 65% ниже, чем у стали. При этом сравнительно низкий предел текучести алюминия повышают за счёт легирования и получения сплавов. Часто сплавы разрабатывают с учётом конкретных условий эксплуатации. Так, для двигательных установок в состав вводят элементы с высокой растворимостью в алюминии, например, магний.

Кальций, обладающий низкой растворимостью, способствует формированию тонких интерметаллических соединений и тем самым улучшает способность материала к заживлению трещин. При охлаждении с его участием образуются как нестабильные, так и стабильные фазы [1]. Кроме того, кальций улучшает литейные свойства сплава, снижая температуру плавления и поверхностное натяжение расплава, а также обеспечивая удачное сочетание механических характеристик [1].

Надёжность сплавов определяется не только их статической прочностью, но и усталостной долговечностью — способностью выдерживать многократные циклические нагрузки без разрушения. Именно усталость нередко становится причиной внезапного выхода деталей из строя.

Проблемы усталостной долговечности алюминиевых сплавов актуальны и при фрикционном взаимодействии. Хотя микродуговое оксидирование эффективно защищает алюминиевые сплавы от коррозии, износа и излучения, такие покрытия обычно имеют повышенный коэффициент трения и невысокую стойкость к сдвиговым нагрузкам. Использование различных модификаторов позволяет создавать антифрикционные покрытия и предотвращать их хрупкое разрушение. При этом износ покрытия часто происходит на уровне шероховатости [2], а в материале основы может накапливаться усталостное повреждение, приводящее к его разрушению.

В настоящей работе приведены результаты испытаний новых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Ca-Mn [3] на малоцикловую усталость при различных соотношениях легирующих компонентов, выполнен расчет напряженного состояния в начальный момент испытаний для неупрочненного материала, а также проведено его сопоставление с напряженным состоянием, возникающим под покрытием, сформированным методом микродугового оксидирования, при параметрах фрикционного нагружения, соответствующих действующим стандартам испытаний покрытий [4].

Для проведения экспериментов был выбран метод усталостных испытаний при изгибе, поскольку в этом случае в образце формируется сложное напряженное состояние, и полученные результаты с большей обоснованностью могут быть использованы в дальнейших исследованиях контактного взаимодействия по сравнению со стандартными испытаниями на растяжение-сжатие. Испытания выполнялись на оригинальной установке для усталостных испытаний «Тестер выносливости композитов» при комнатной температуре T = 19 ℃. Длина консольной части образца изменялась от 60 до 90 мм с шагом 10 мм. Частота нагружения и амплитуда перемещения свободного конца образца составляли 30 Гц и ±10 мм соответственно. Из прокатанных сплавов Al-0,5Mg-2Ca-0,8Mn (1) и Al-3Mg-2Ca-0,8Mn (2) вырезали образцы размером 150×10×1 мм.

Разрушение образцов происходило в зоне закрепления. В ряде случаев, в частности для сплава 2 при длине консольной части 80 и 90 мм, макроразрушение не наблюдалось. Структуру образцов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta 650 (FEI, США). В обоих сплавах вблизи зоны разрушения были обнаружены микротрещины, отсутствующие в средней части образца. Особый интерес представляет область закрепления у неразрушившегося образца. На рис. 1а показана поверхностная трещина, распространяющаяся в направлении возможного излома от края образца к поверхностному дефекту.

При малоцикловой усталости в алюминии возникает локальная пластическая деформация, сопровождающаяся упрочнением, вследствие чего упругие и прочностные характеристики становятся неоднородными по объему. Развитие этих процессов определяется исходным напряженным состоянием, которое было рассчитано в рамках теории упругости с учетом геометрии каждого образца и условий эксперимента, где задавалась амплитуда смещения свободной части образца.

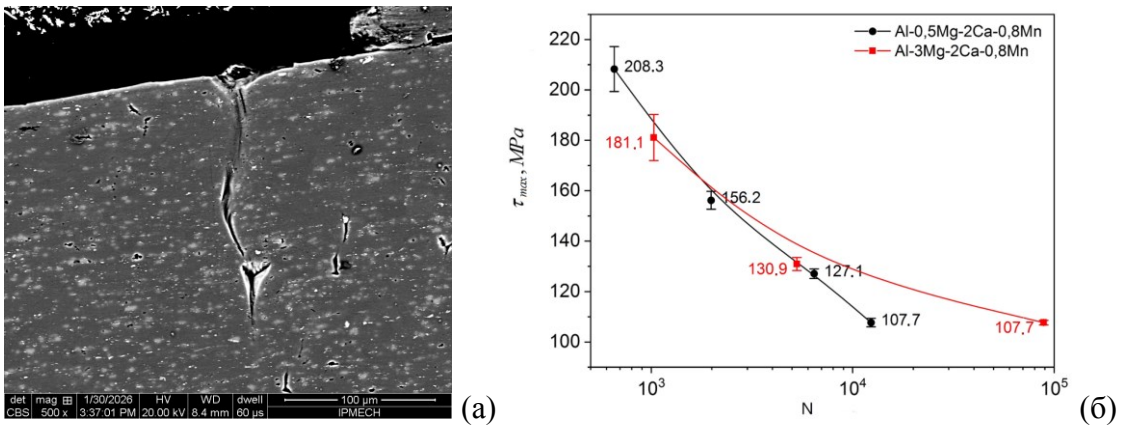


Рис. 1. - Профилограмма дорожки трения после испытания (а) и СЭМ изображения поверхностей дорожек трения образцов с минимальным (б) и максимальным (в) количеством суспензии в электролите

Связь числа циклов до разрушения и максимальных касательных напряжений представлена на рис. 1б. Кривые имеют типичный вид усталостных диаграмм (кривых Веллера). Сплав 2 с более высоким содержанием магния имеет более высокий предел текучести (135 МПа против 110 МПа у сплава 1). Это напрямую отражается на усталостной долговечности. При сопоставимых уровнях напряжения сплав 2 демонстрирует существенно большее число циклов до разрушения.

Керамические покрытия при фрикционном нагружении ведут себя как упругие материалы. Их разрушение в виде выкрашивания чаще всего связано с тем, что превышаются пределы прочности на растяжение или сдвиг, а также с накоплением контактно-усталостных повреждений как в самом покрытии, так и в подложке. Поэтому для таких условий необходимо рассчитывать напряженное состояние при трении. Подробное решение этой задачи приведено в [5].

В рассматриваемом случае исследовались алюминиевые сплавы, поэтому для анализа были выбраны максимальные касательные напряжения в подложке. Их распределение оказалось заметно несимметричным из-за действия трения, а наибольшие значения наблюдались на границе раздела. Это справедливо для всех изученных сочетаний входных параметров.

Как и следовало ожидать, рост нагрузки и коэффициента трения приводит к увеличению максимальных напряжений в подложке. Влияние толщины покрытия и модуля Юнга менее однозначно. С одной стороны, увеличение толщины повышает общую жесткость системы «покрытие–подложка» и приводит к росту максимального контактного давления. С другой стороны, граница раздела при этом удаляется от поверхности. Аналогично на напряжения в подложке влияет и увеличение жесткости покрытия.

Сопоставление максимальных касательных напряжений, возникающих в начале усталостных испытаний и в начале фрикционных испытаний, показывает, что при точечном контакте они выше при любой комбинации расчетных параметров. Простой расчет числа циклов фрикционного нагружения при реализации стандарта ASTM G99 дает значение 9952 цикла. При испытаниях на циклическую усталость большее число циклов выдержали только образцы с расчетными начальными напряжениями 100–110 МПа. Следовательно, если при трении контакт остается точечным, как в идеальном случае, предусмотренном стандартом, то усталостное разрушение подложки неизбежно приведет к отслаиванию покрытия.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.6.3.

Литература

1. Белов Н.А., Наумова Е.А., Акопян Т.К. Эвтектические сплавы на основе алюминия: новые системы легирования. М.: Руда и металлы. 2016. 256 с.
2. Torskaya E., Shkalei I., Morozov A., и др. Structure, friction and wear of AlZn5.5MgCu based PEO coatings modified by diamond nanoparticles and silver micropowder. // Tribol. Int. 2025.Vol. 203. P. 110417. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110417.
3. Doroshenko V., Aksenov A., Fortuna A., и др. Impact of Calcium Addition on Microstructural and Mechanical Properties of Al-3% Mg-0.8% Mn Alloy Under Different Treatment Paths. // Met. Mater. Int. 2025. Vol. 31. N 8. P. 2363–2379. https://doi.org/10.1007/s12540-024-01885-5.
4. Scientific and production closed joint stock company “Sinta”. URL: https://en.sinta.biz/nanodiamonds.
5. Торская Е.В., Степанов Ф.И. Моделирование индентирования относительно жестких покрытий индентором произвольной формы. // Трение и износ 2019. Т. 40. № 4. С. 417–423.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЯМИ

Горячева И.Г., Яковенко А.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Износ тел, возникающий при их фрикционном взаимодействии, обусловлен различными механизмами. При циклическом характере нагружения, как правило, наблюдается усталостный износ, характеризующийся интенсивным накоплением поврежденности в приповерхностных слоях материалов взаимодействующих тел. Скорость этого процесса зависит от многих факторов, в том числе от механических и прочностных свойств самих контактирующих тел, условий взаимодействия и т.д. Исследование процессов изнашивания деформируемых тел имеет большое значение для прогнозирования функциональных характеристик трибосопряжений и для расчета их долговечности по износу.

Теоретическое исследование влияния остаточных напряжений на процесс накопления контактно-усталостных повреждений в материалах контактирующих тел при их фрикционном взаимодействии проведено в [1] на основе решения контактной задачи о скольжении и качении упругого цилиндра по однородному упругому преднапряженному основанию. Использование в трибосопряжениях различного рода покрытий, улучшающих их трибологические характеристики (в частности, снижающих коэффициент трения) потребовало обобщения построенной модели с целью анализа влияния тонких смазочных покрытий на процесс накопления повреждений в материале основания и кинетику его контактно-усталостного изнашивания.

1. Постановка задачи и метод решения. Рассматривается контактная задача качения бесконечного упругого цилиндра радиуса R по упругой преднапряженной полуплоскости с постоянной линейной скоростью V и угловой скоростью ω. Предполагается, что материала цилиндра и полуплоскости совпадают. На поверхности основания может быть нанесено тонкое покрытие, которое, будем считать, оказывает влияние только на коэффициент трения, возникающий в области контактного взаимодействия. Задача рассматривается в плоской квазистатической постановке и решается в подвижной системе координат (x, z), которая связана с движущимся цилиндром. При циклическом движении цилиндра в приповерхностных слоях упругой полуплоскости накапливаются усталостные повреждения.

Решение рассматриваемой контактной задачи качения, а также моделирование процесса накопления контактно-усталостной поврежденности в материале упругой полуплоскости при наличии в ней остаточных напряжений представлено в работе [1].

В условиях качения с проскальзыванием область контакта из двух подобластей: сцепления и проскальзывания. В области сцепления равна нулю скорость относительного проскальзывания, а в области проскальзывания

выполняется закон трения Амонтона, связывающий нормальные p и касательные q контактные напряжения через коэффициент трения μ. Предельным случаем, когда вся область контакта представляет собой область проскальзывания, является задача скольжения.

Для расчета контактных напряжений в [2] получены аналитические выражения, которые позволяют определить распределения напряжений внутри упругого материала, в частности, эквивалентные напряжения, в том числе напряжения фон Мизеса. Считается, что влияние остаточных напряжений, присутствующих в полуплоскости, на решение контактной задачи пренебрежимо мало. Для определённости полагается, что в полуплоскости наведены остаточные напряжения σ_x^{res}, которые зависят только от расстояния от поверхности z. Тогда выражение для эквивалентных напряжений фон Мизеса запишутся следующим образом:

$$\sigma_{VM}(x,z)=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_x+\sigma_x^{res}-\sigma_y\right)^2+\left(\sigma_y-\sigma_z\right)^2+\left(\sigma_z-\sigma_x-\sigma_x^{res}\right)^2+6\tau_{xz}^2}\,. \quad (1)$$

Для моделирования накопления усталостной поврежденности в материале полуплоскости используется макроскопический подход [3], подразумевающий построение функции поврежденности Q, зависящей от некоторых критериальных напряжений, например, амплитудных значений напряжений фон Мизеса $\Delta\sigma_{VM}$. Накопленная за N циклов поврежденность полуплоскости на глубине z определяется следующей формулой:

$$Q(z,N)=Nc\left(\frac{\Delta\sigma_{VM}(z)}{p_0}\right)^m+Q_0(z), \quad (2)$$

где c и m – экспериментально определяемые параметры модели, p_0 – максимальное контактное давление, Q_0 –начальная поврежденность полуплоскости, а напряжения $\Delta\sigma_{VM}$ определяются формулой (1).

Расчеты функции поврежденности в разные моменты времени велись для распределений касательных напряжений в области контактного взаимодействия, определяемых с учетом существования на поверхности различных тонких смазочных покрытий, влияющих на коэффициент трения катка по основанию, что позволило проанализировать эффект наличия на поверхности тел покрытий из разных материалов.

2. Численные расчеты. Для определенности рассматривается случай постоянных по глубине упругой полуплоскости остаточных напряжений. Чтобы проанализировать эффект наличия на поверхности взаимодействующих тел покрытий рассмотрено два значения коэффициента трения, μ = 0.5 и μ = 0.2. При этом меньшее значение коэффициента трения соответствует случаю наличия покрытия, а большее – случаю без покрытия. Другие параметры, а именно коэффициент Пуассона ν и величина относительного проскальзывания δ = (ωR – V)/V, не варьируются.

На рис.1 представлено распределение амплитудных значений напряжений фон Мизеса по глубине полуплоскости при наличии постоянных растягивающих и сжимающих остаточных напряжений $\sigma_x^{res}=\pm p_0$ (p_0 – максимальное контактное давление, определяемое из теории Герца) при двух значениях коэффициента трения μ, соответствующих наличию (μ = 0.2) и отсутствию (μ = 0.5) покрытия. Из результатов следует, что наличие покрытия ведет к снижению максимального

значения $\Delta\sigma_{VM}$, а следовательно, исходя из (2), и поврежденности материала полуплоскости Q. При этом в случае сжимающих остаточных напряжений наличие покрытия ведет к снижению амплитудных значений σ_{VM} практически по всей рассмотренной глубине полуплоскости. В случае растягивающих остаточных напряжений наличие покрытия приводит к тому, что максимальное значение $\Delta\sigma_{VM}$, а значит и поврежденности, смещается с поверхности полуплоскости в подповерхностную область.

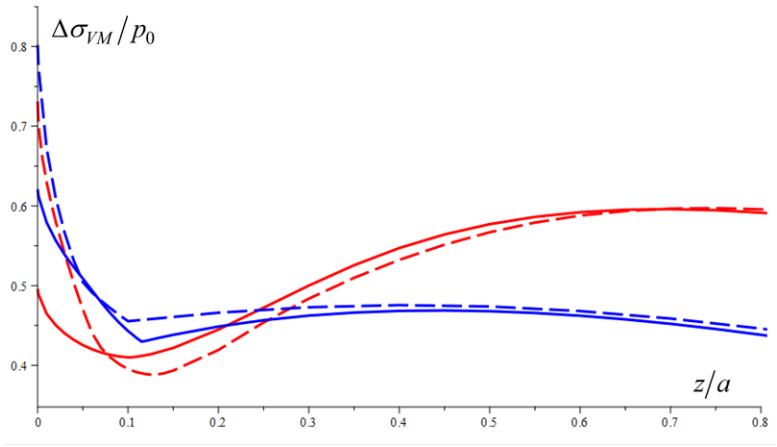


Рис. 1. – Зависимость амплитудных значений напряжений фон Мизеса от глубины при наличии растягивающих (а) и сжимающих (б) остаточных напряжений при наличии покрытия (гладкие линии) и без него (пунктирные линии); $\nu = 0.3$, $\delta = 0.1a/R$

3. Выводы. Представленные в работе результаты позволяют оценить влияние на процесс контактно-усталостного изнашивания упругих преднапряженных тел в условиях трения качения наличия на них смазочных покрытий. Получено, что снижение коэффициента трения за счет наличия покрытий приводит к уменьшению поврежденности материала в области вблизи контактирующей поверхности, а также к снижению ее максимального значения. Это приводит к уменьшению скорости контактно-усталостного изнашивания. Разработанная модель и полученные результаты могут быть использованы для анализа эффективности нанесения смазочных покрытий при разных условиях контактного взаимодействия (трение качения или скольжения).

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.6.4.

Литература

1. Горячева И.Г., Яковенко А.А., Гачегова Е.А., Пантелеев И.А. Моделирование влияния остаточных напряжений на контактно-усталостное разрушение упругих тел в условиях трения скольжения/качения // Физическая мезомеханика. 2025. Т. 28, № 4. С. 77-95. https://doi.org/10.55652/1683-805x_2025_28_4_77-95

2. Carter F.W. On the action of a locomotive driving wheel // Proceedings of the Royal Society A. Vol. 112. 1926. Pp. 151-157.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХМЕРНОЙ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА КОНТАКТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ТРЕНИЯ ПОКОЯ К ТРЕНИЮ СКОЛЬЖЕНИЯ

Цуканов И.Ю., Любичева А.Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

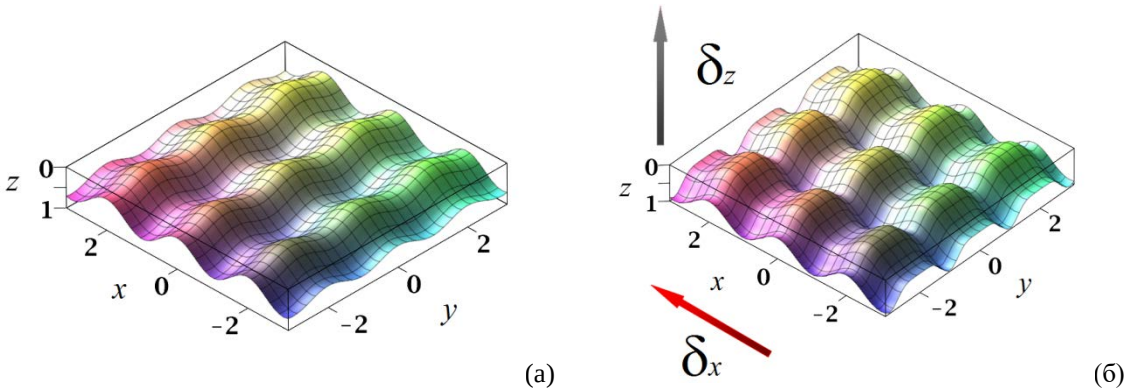
В работе представлен анализ влияния текстуры поверхностей на переход от трения покоя к трению скольжения при взаимодействии жесткого тела с упругим основанием на основе решения пространственной контактной задачи.

При создании текстуры с помощью технологической обработки основными параметрами, которыми можно управлять, являются высота профиля, расстояние между углублениями или выступами и кривизна выступа/углубления. В данной работе было предложено использование следующей периодической функции, позволяющей варьировать указанными параметрами:

$$f(x,y) = A_x \sin^2\left(\frac{\pi x}{L_x}\right) + A_y \sin^{2n}\left(\frac{\pi y}{L_y}\right)$$

где A_x, A_y – высоты профиля в направлениях осей x и y соответственно; L_x, L_y – расстояния между выступами (впадинами) вдоль осей x и y соответственно; $n \in \mathbb{N}^*$ – параметр формы выступа (впадины) в направлении оси y. С увеличением n растет ширина плоского участка выступов в сечении, а углубления становятся более узкими.

На рис. 1 изображены примеры текстур с различными n, A_x, A_y, L_x, L_y.



(а) (б)

Рис. 1. - Текстурированные поверхности (показаны выступами вверх): $n = 1$, $A_x/L_x = 0.25$, $A_y/L_y = 0.125$ (*а*); $n = 3$, $A_x/L_x = 0.25$, $A_y/L_y = 0.25$ (*б*)

Текстурированная поверхность считается недеформируемой, упругий отклик контртела опишем моделью упругого основания толщиной H, обладающего вертикальной и горизонтальной податливостью [1]. Для решения трехмерной контактной задачи использован метод полос [2] в предположении, что деформации в каждой i-ой полосе (сечении) не зависят друг от друга. Для исследования влияния

геометрических параметров текстуры на максимальную горизонтальную силу и смещение, при которых тела остаются в состоянии покоя, при описании упругих деформаций полупространства разобьем поверхность основания на $2N$ сечений (полос) параллельно оси приложения горизонтальной (сдвигающей) силы (i = 1, 2…$2N$).

В результате действия вертикальной P и горизонтальной Q нагрузок происходит взаимное сближение тел в вертикальном направлении на величину δ_z, а также смещение текстурированной поверхности на величину δ_x. В каждой полосе $y^{(i)} \in [1; y^{(N)}]$ в области контакта $2a^{(i)}$ возникают зона сцепления $[c_1^{(i)}, c_2^{(i)}]$ и две зоны проскальзывания $[-a^{(i)}, c_1^{(i)}] \cup [-a^{(i)}, c_2^{(i)}]$. Касательные усилия $q(x)$ в зонах проскальзывания описываются согласно закону Амонтона:

$$q(x) = -\mu p(x), \quad \left|c^{(i)}\right| \le |x| < \left|a^{(i)}\right|$$

где μ – коэффициент трения.

Горизонтальные $u_x^{(i)}(x)$ и вертикальные $u_z^{(i)}(x)$ перемещения основания в каждой полосе связаны с горизонтальными $p_x^{(i)}(x)$ и вертикальными $p_z^{(i)}(x)$ усилиями линейными соотношениями [1, 2]:

$$p_x^{(i)}(x) = k_x u_x^{(i)}(x); \quad p_z^{(i)}(x) = k_z u_z^{(i)}(x)$$

где k_z и k_x – коэффициенты жесткости основания в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Распределение нормальных и касательных усилий (смещений) в зонах сцепления и проскальзывания определяется решением соответствующей плоской задачи [1] с заранее неизвестными границами. Уравнения равновесия в вертикальном и горизонтальном направлении имеют вид:

$$P = 2k_z \sum_{i=1}^{N} \Delta y \int_{-a^{(i)}}^{a^{(i)}} u_z^{(i)}(x)dx; \quad Q = 2k_x \sum_{i=1}^{N} \Delta y \int_{-a^{(i)}}^{a^{(i)}} u_x^{(i)}(x)dx$$

где Δy – ширина полосы.

В результате получены выражения для определения величины вертикального внедрения δ_z, максимального горизонтального смещения δ_x^* и размеров эллиптической области сцепления перед началом скольжения $\tilde{c}$ и $\tilde{b}$ (при n = 1) в зависимости от приложенной вертикальной нагрузки, коэффициентов жесткости основания и геометрических параметров текстурированной поверхности.

$$\delta_z = \left(\frac{P}{K}\right)^{\frac{2n}{3n+1}}, \quad K = \frac{8k_z A_x L_x}{3\pi^2 2n A_x^{\frac{1}{2}} A_y^{\frac{1}{2n}}} \mathrm{B}\left(\frac{1}{2n}, \frac{5}{2}\right);$$

$$\delta_x^* = \frac{\mu k_z \delta_z}{k_x}; \quad \frac{\tilde{c}}{\tilde{b}} = \frac{L_x}{L_y}\sqrt{\frac{A_y}{A_x}}$$

где B(x, y) - бета-функция.

Полученные выражения показали, что максимальная горизонтальная сила в состоянии покоя соответствует значению, вычисленному для центрального сечения (i = 1), что соответствует решению для плоской задачи [2], а максимальное горизонтальное смещение – определяется условиями взаимодействия во всей области контакта. Показано, что для малых номинальных давлений рациональная геометрия текстуры должна иметь большую амплитуду и больший радиус кривизны выступов, в то время как при больших нагрузках существенным

становится возможность достижения насыщения контакта, которая увеличивается с уменьшением амплитуды и радиуса кривизны неровностей (рис. 2). Анализ геометрии зоны сцепления перед началом скольжения в предельном случае полного контакта показал, что при $n = 1$ область сцепления эллиптическая, а при $n > 1$ представляет собой кривую Ламе. При этом для полного контакта при $n = 1$ размеры области сцепления не зависят от отношения коэффициентов жесткости и горизонтального смещения. Сравнение геометрии зоны сцепления перед началом скольжения при $n = 1$ с теорией Каттанео и Миндлина для упругого полупространства [3] показало, что в случае сплошной среды область сцепления также имеет эллиптическую форму, но с меньшей площадью, что говорит о меньшей длительности процесса предварительного смещения.

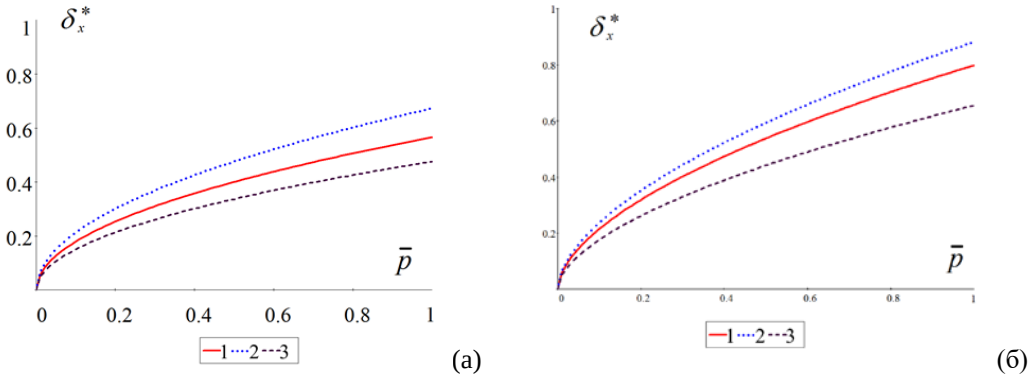


Рис. 2. Зависимость максимального горизонтального сдвига выступов текстуры в начале движения δ_x^*от номинального давления $\bar{p}=P/L_xL_y$ при $n = 1$ (*а*) $n = 2$ (*б*) для разных безразмерных амплитуд: $A_x/L_x = 0.1$, $A_y/L_y = 0.05$ (кривая 1); $A_x/L_x = 0.1$, $A_y/L_y = 0.1$ (кривая 2); $A_x/L_x = 0.05$, $A_y/L_y = 0.05$ (кривая 3)

5. Выводы. Проведенное исследование позволяет научно обоснованно выбирать геометрию текстурированной поверхности для достижения необходимых противоскользящих свойств в режиме предварительного смещения (трения покоя).

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.6.5.

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. P. 104405. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2021.104405
2. Любичева А. Н. Анализ взаимного влияния пятен контакта при скольжении периодической системы неровностей по вязкоупругому основанию винклеровского типа // Трение и износ. 2008. Т. 29, № 2. С. 125–133.
3. Barber J.R. Contact Mechanics. Springer International Publishing, Basel, 2018. 592 p.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОБОСНОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВТОРНОЙ ОТРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Барях А.А., Цаюков А.А., Евсеев А.В., Ломакин И.С., Федосеев А.К., Ударцев А.А.

«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

При разработке месторождений, помимо обеспечения безопасности, одной из главных задач является максимально полное извлечение полезных ископаемых из недр. На ряде рудников при высокой ценности руды реализуются различные варианты сплошных слоевых и камерных систем разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями (ПАО «ГМК «Норильский никель», АК «АЛРОСА» и др.).

На Верхнекамском месторождении солей применяется камерная система разработки с оставлением междукамерных целиков и закладкой выработанного пространства. Это позволяет снизить скорости оседания и конечные деформации водозащитной толщи до допустимых значений. Однако сложная гипсометрия продуктивной толщи и технологические особенности ограничивают полноту закладки. Фактическая степень заполнения камер, как правило, не превышает 0.75–0.80. Из-за оставшихся пустот двухстадийная выемка, при которой запасы целиков извлекают после консолидации закладочного массива, не применяется. В результате коэффициент извлечения руды из промышленных пластов не превышает 50 %. Кроме того, теряются запасы маломощных сближенных пластов, отнесённых к забалансовым. После завершения горных работ рудники в большинстве случаев ликвидируют мокрым способом, и доступ к продуктивной толще традиционными методами фактически теряется навсегда.

Вместе с тем в силу реологических свойств соляных пород междукамерные целики со временем деформируются. При определённых параметрах отработки это может приводить к задавливанию всех пустот ещё в период эксплуатации рудника и к формированию в интервале рабочих пластов природно-техногенного пласта с механическими свойствами, требуемыми для поддержания вышележащих пород. Это создаёт предпосылки для реализации повторной отработки запасов.

Срок формирования техногенного пласта зависит от объёма пустот, который определяется коэффициентом извлечения и степенью заполнения камер закладочным материалом, а также от скорости деформирования вмещающих пород и междукамерных целиков. Длительные испытания на ползучесть показали, что скорость деформирования соляных пород определяется действующей нагрузкой [1, 2]. Сопоставление этих закономерностей с результатами маркшейдерских наблюдений за оседанием земной поверхности и измерений горизонтальной конвергенции очистных камер позволило получить расчётные формулы для определения срока формирования природно-техногенного пласта в зависимости от параметров отработки и закладки.

Другим важным аспектом при планировании отработки и обосновании безопасности являются геомеханические расчёты, адекватно описывающие

деформирование отрабатываемого массива. Современные инженерные системы анализа предоставляют в основном стандартные модели, которые не отражают в полной мере особенности деформирования соляных горных пород. Более того, их часто очень сложно параметрически обеспечить. Механические свойства, получаемые по результатам лабораторных экспериментов, в значительной мере искажены влиянием масштабного фактора, что приводит к необходимости введения различных поправочных коэффициентов.

Феноменологические аспекты геомеханических процессов, протекающих в соляном массиве при ведении горных работ, могут быть описаны путём разделения деформаций на зависящие и не зависящие от времени составляющие. В практике геомеханического моделирования такой подход реализуется с помощью вязкопластических моделей и введения дополнительных предельных поверхностей [3–6], а также соответствующих зависимостей напряжений и деформаций через переменные внутреннего состояния. Такие модели являются более естественными, поскольку отражают необратимый процесс деформирования. Концепция нескольких предельных поверхностей применяется к описанию реологии квазипластичных горных пород и грунтов [3, 6, 7, 8].

В работе для моделирования развития во времени деформационных процессов в горных породах с учётом их предельного состояния предложен подход, основанный на теории вязкопластичности Пэжины [9], использующий концепцию двух предельных поверхностей, где не конкретизируется их геометрический вид, и модификацию метода проекции напряжений, описанного в [10, 11].

К основному критерию текучести (или прочности) $\Phi(\sigma, \sigma_y) = 0,$ который определяет изоповерхность в пространстве напряжений и задаётся через соответствующий предел, добавляется изоповерхность ползучести $\Phi(\sigma, \sigma_{\text{СТ}}) = 0$, определяемая через порог ползучести $\sigma_{\text{СТ}} = w\sigma_y, \quad w \in (0,1)$. Коэффициент w обозначает относительный уровень напряженного состояния, с которого активируется процесс ползучести горной породы либо начинают проявляться временные эффекты. Также вводятся проекции на соответствующие изоповерхности

$$\bar{\sigma}^* = \beta\sigma, \quad \underline{\sigma}^* = \omega\sigma, \tag{1}$$

где β и ω – коэффициенты нижней и верхней проекций соответственно. Вместо традиционного эквивалентного напряжения ползучести используется функция относительного уровня напряжений между двумя изоповерхностями

$$\sigma^{cr} \equiv s(\sigma, \sigma_{\text{СТ}}, \sigma_y) = \frac{1-\omega}{\beta-\omega}, \tag{2}$$

которая служит для определения деформаций

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = \dot{\lambda}^{cr}(s(\sigma, \sigma_{\text{СТ}}, \sigma_y))\beta\frac{\partial\Psi}{\partial\bar{\sigma}^*}, \tag{3}$$

зависящих от времени и развивающихся при $\Phi(\sigma, \sigma_{\text{СТ}}) > 0$. Здесь Ψ – (вязко) пластический потенциал. Деформации, не зависящие от времени, при этом определяются как $\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda}^p\,\partial\Psi/\partial\sigma$ и возникают при $\Phi(\sigma, \sigma_y) = 0,$ учитывая предельное состояние.

На примере двухпластового камерного сегмента, отражающего отработку комбайнами Урал-20Р сильвинитовых пластов АБ и КрII на рудниках Верхнекамского месторождения солей (ПАО «Уралкалий»), выполнено моделирование (рис. 1, модель 1) его деформационного поведения в условиях

гравитационного поля напряжений. Расчётная схема соответствовала условиям полной подработки. Калибровка модели производилась по результатам наблюдений в камере пласта КрII (нижнего пласта), поскольку экспериментальные значения деформации камеры пласта АБ малы, и ими можно пренебречь. В качестве критерия пластичности использовался объёмный параболический критерий прочности горных пород с ассоциированным течением неупругой деформации, а также связанный с ним закон вязкопластичности

$$\dot{\lambda}^{cr} = 1/\eta[(1+s(\sigma,\sigma_{\text{СТ}},\sigma_y))^{1/m} - 1] \quad (4)$$

подобный модели Перича. Результаты моделирования представлены на рис. 1 в сравнении с аналогичными расчётами (модель 2), проведёнными с помощью классической упруго-вязкопластической модели, реализованной для того же критерия пластичности (прочности) в связке с законом вязкопластичности Перича [12].

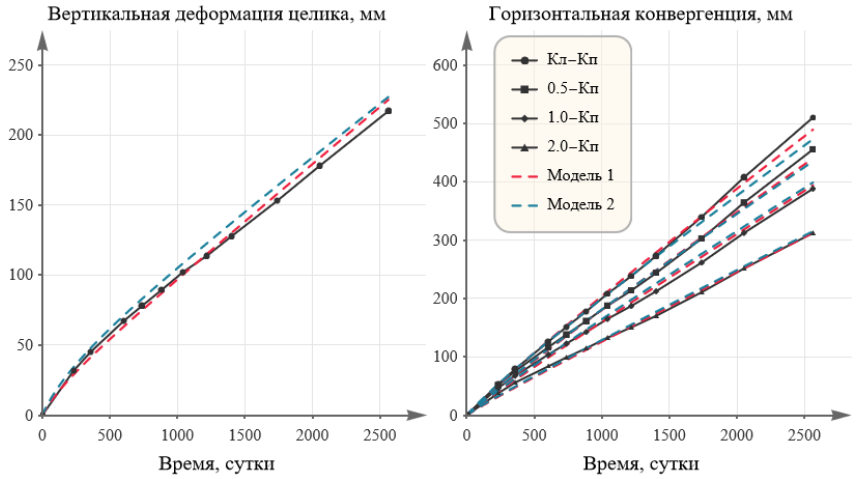


Рис. 1. – Результаты моделирования процесса деформирования камерного сегмента во времени в камере пласта КрII. Обозначения: Кл – контурный левый репер; Кп – контурный правый репер; 0.5–3.0 – глубинные реперы *(глубина установки, м)*, расположенные на левой стороне очистной камеры.

Проведённый сравнительный анализ показал, что, в равной степени адекватно описывая диаграммы деформаций в камерном сегменте, модель с введённым порогом ползучести дает картину нарушений, которая лучше соответствует фактическому характеру разрушения породного массива при камерной системе разработки. При этом параметрическое её обеспечение базируется на реальных свойствах соляных пород.

Таким образом, предложенная модель деформирования горных пород во времени с учётом предельного состояния способна как качественно, так и количественно описывать деформационное поведение породного массива около выработанного пространства на рудниках соляных месторождений, используя параметрическое обеспечение, получаемое в лабораторных условиях. Её использование для моделирования развития деформаций междукамерных целиков позволит прогнозировать сроки формирования природно-техногенного пласта и выделять участки, пригодные для повторной отработки калийных солей.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.7.1.

Литература

1. Baryakh A.A., Evseev A.V., Udartsev A.A. Experimental justification of the fracture criteria of interchamber pillars // ISRM International Symposium – EUROCK 2020. – International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020. – ISBN 978-82-8208-072-9.
2. Ju Y., Chen M., Lu Y. New approach to investigate rock salt creep behavior under triaxial stress // SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference (GOTECH). – Dubai, UAE, 2024. – DOI: 10.2118/219301-MS.
3. Huang X., Liu Q.S., Bo Y., Liu B., Ding Z.W., Zhang Q.T. An elasto-plastic and viscoplastic damage constitutive model for dilatancy and fracturing behavior of soft rock squeezing deformation // Journal of Mountain Science. – 2022. – Vol. 19. – P. 826–848. – DOI: 10.1007/s11629-020-6530-4.
4. Ebrahimi Zohravi S., Lakirouhani A., Molladavoodi H., Medzvieckas J., Kliukas R. A new constitutive model for the time-dependent behavior of rocks with consideration of damage parameter // Journal of Civil Engineering and Management. – 2022. – Vol. 28, No. 3. – P. 223–231. – DOI: 10.3846/jcem.2022.16609.
5. Lu G.D., Zhou J.W., Liu J.F., Liu L., Yang X.G., Tao J. A bounding surface viscoplastic damage model for time-dependent rock deformation // Mechanics of Materials. – 2023. – Vol. 180. – Art. 104609. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2023.104609.
6. Debernardi D., Barla G. New viscoplastic model for design analysis of tunnels in squeezing conditions // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2009. – Vol. 42. – P. 259–288. – DOI: 10.1007/s00603-009-0174-6.
7. Yang F., Fan J., Yang Zh., Liu W., Chen J. Plasticity analysis and constitutive model of salt rock under different loading speeds // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 67. – Art. 107583. – DOI: 10.1016/j.est.2023.107583.
8. Tang L., Fan J., Li Z., Chen J., Liu W. A new constitutive model for salt rock under cyclic loadings based on state variables // Geoenergy Science and Engineering. – 2024. – Vol. 233. – Art. 212433. – DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212433.
9. Perzyna P. Fundamental problems in viscoplasticity // Advances in Applied Mechanics. – 1966. – Vol. 9. – P. 243–377.
10. Abaqus Analysis User's Guide. Vol. III: Materials. – 2016.
11. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 2021 R2. – 2021.
12. Барях А.А., Цаюков А.А., Самоделкина Н.А., Девятков С.Ю. Модель упруго-вязкопластического деформирования соляных междукамерных целиков // Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях : программа и тезисы докладов отчетной конференции по итогам 2-го этапа выполнения проекта (Пермь, 12–13 ноября 2025 г.). – Пермь : ПФИЦ УрО РАН, 2025. – С. 82–83.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТЕХНОЛОГИИ ПОВТОРНОЙ ОТРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ РУД

Барях А.А., Бельтюков Н.Л., Девятков С.Ю., Евсеев А.В., Паньков И.Л., Самоделкина Н.А.

«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Современный этап развития отечественной калийной промышленности характеризуется доработкой запасов кондиционных руд, залегающих в относительно благоприятных горно-геологических условиях. В этой связи горнодобывающие предприятия переходят к освоению участков сложного строения, отличающихся большими глубинами ведения работ [1] и приуроченностью к краевым зонам месторождений. Наряду с этим актуальным направлением восполнения сырьевой базы рудников становится вовлечение в отработку забалансовых руд [2], а также повторная выемка запасов на ранее отработанных участках шахтных полей.

Реализация технологии повторной отработки на Верхнекамском месторождении калийных солей возможна на участках, отработанных ранее с оставлением податливых междукамерных целиков [3]. Вследствие их интенсивного деформирования и разрушения под действием горного давления произошло погашение очистных камер с формированием непрерывного вторичного природно-техногенного пласта. Ведение горных работ в данных условиях является уникальной для горной практики задачей. В связи с этим на экспериментальном участке шахтного поля рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий» были проведены опытно-промышленные испытания (ОПИ), одной из целей которых являлась детальная оценка фактического строения природно-техногенного пласта КрII* и установление особенностей его деформирования для обоснования безопасных параметров повторной выемки.

Научное сопровождение ОПИ включало комплекс полевых и лабораторных исследований. В результате структурно-геологических наблюдений и анализа отобранного кернового материала установлено, что природно-техногенный пласт КрII* на участке ОПИ имеет зональное строение и представлен чередованием деформированных междукамерных целиков и участков консолидированных пород в погашенных камерах. Забутовка камер сложена преимущественно материалом сильвинитового пласта КрII без систематических обрушений пород вышележащего междупластья АБ-КрII. В результате поперечного деформирования ширина междукамерных целиков по почве пласта увеличилась с 3,8 до 5,0-6,0 м, а мощность пласта сократилась с начальных 4,6 м до 2,4-2,6 м в зонах обрушения и до 2,6-2,8 м в целиках. При этом из-за вариативности фактических размеров первичных целиков и неравномерности их деформирования в массиве природно-техногенного пласта сохраняются единичные участки неполного погашения камер и локальные пустоты, нередко вмещающие конденсационные рассолы.

По результатам лабораторных испытаний установлено, что породы природно-техногенного пласта КрII* характеризуются существенной дифференциацией прочностных и деформационных свойств. Среднее значение предела прочности на

сжатие пород, слагающих междукамерные целики, составляет 23,5 МПа при модулях деформации (D_y) и упругости (E) 2,3 и 15,9 ГПа соответственно, что сопоставимо со свойствами нетронутого массива природного пласта КрII*. Для пород в зонах обрушения характерны более низкая плотность и снижение прочности в среднем до 8,6 МПа при значениях модулей деформации и упругости 0,8 и 9,1 ГПа соответственно. Натурные испытания крупномасштабных образцов также подтвердили ярко выраженную дифференциацию прочностных параметров: предел прочности пород в центральной части междукамерных целиков составляет в среднем 20,6 МПа, тогда как консолидированных пород в зонах обрушения – 2,0 МПа.

Результаты инструментального мониторинга состояния выработок в природно-техногенном пласте свидетельствуют об отсутствии аномально высоких величин смещений их контура. Скорости смещения пород кровли варьируются в интервале от 11,8 до 40,6 мм/год в зависимости от горно-геологических условий на участках заложения наблюдательных станций. Наибольшие скорости вертикальной конвергенции приурочены к участкам пересечения выработок с первичными междукамерными целиками, а минимальные – к зонам обрушенных пород. Горизонтальные деформации по ширине неоднородных целиков распределяются неравномерно: максимальные скорости смещений фиксируются в приконтурной части массива (21,6-28,0 мм/год), а на глубине более 1,5 м они существенно снижаются и принимают условно постоянные значения.

На текущий момент пройденные на участке ОПИ по природно-техногенному пласту КрII* исследовательские выработки в целом находятся в устойчивом состоянии, массовых случаев образования заколов, обрушений пород и вывалов не наблюдается. Данные натурного мониторинга подтверждают, что принятые технические решения в полной мере обеспечили устойчивость выработок на всех этапах выполнения работ.

Таким образом, положительные результаты проведенных опытно-промышленных испытаний доказали техническую возможность и безопасность ведения горных работ в границах сформированного природно-техногенного пласта КрII* на участках, отработанных ранее с оставлением податливых междукамерных целиков.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.7.2.

Литература

1. Рыльникова М.В., Есина Е.Н., Сахаров Е.М., Бергер Р.В. Закономерности геодинамических явлений при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений калийно-магниевых солей // Горная промышленность. 2023. № 1. С. 89-94. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-89-94
2. Головатый И.И., Чижик С.А., Петровский А.Б., Прушак В.Я. Разработка технологии доизвлечения запасов калийной руды из ранее отработанных панелей на глубинах свыше 600 метров Старобинского месторождения калийных солей // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2022. Т. 67, № 2. С. 182-190. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-182-190
3. 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

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПОВТОРНОЙ ОТРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Иванов С.В., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л.

«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Повышение извлечения запасов на действующих калийных рудниках Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) в последние годы связывается с возможностью повторной отработки ранее погашенных площадей. На отдельных участках ВКМС, где отработка сильвинитового пласта КрII велась в 70-х годах прошлого столетия, к настоящему времени сформировался вторичный природно-техногенный пласт КрII* с практически постоянной выемочной мощностью 2,8–3,2 м, отработка которого возможна комбайнами малого сечения как по первичным междукамерным целикам, так и по забутованным камерам [1].

При этом природно-техногенный пласт является существенно неоднородным по своим физико-механическим свойствам. Прочность пород забутовки камер варьирует от 0,3 до 8,6 МПа и в среднем более чем в 5 раз ниже прочности нетронутого пласта КрII; прочность пород бывших целиков снижена на 34 % за счет техногенной трещиноватости. Следует принимать во внимание, что в отдельных камерах возможно сохранение остаточных полостей, зон разуплотнения и протяженных трещин, вскрытие которых при проходке или их расположение во вновь оставляемых неоднородных целиках может приводить к вывалам, потере устойчивости несущих элементов и газодинамическим явлениям. В таких условиях целесообразно применение геофизических исследований массива, направленных как на выявление неоднородностей природно-техногенного пласта до и в процессе его отработки, так и на контроль формируемых междукамерных целиков.

Опыт шахтных сейсмоакустических исследований на ВКМС [2–12] позволяет выделить ряд технологий, методические принципы которых могут быть перенесены на условия повторной отработки природно-техногенного пласта. Наиболее близким прототипом является сейсморазведочный контроль закладки выработанного пространства [2–4]. В обоих случаях целевым объектом является очистная камера, заполненная материалом с пониженными упругими и плотностными характеристиками, а поисковыми объектами – остаточные полости. По результатам полноволнового моделирования [2] и натурных экспериментов [3, 4] установлено, что при увеличении степени заполнения камер амплитуды отраженных P-волн уменьшаются, а амплитуды S-волн возрастают. Кинематические параметры реагируют на заполнение камер ростом интервальных скоростей, а зоны повышенной нарушенности (пустотности) проявляются латеральными градиентами коэффициента Пуассона. Кроме этого, показана потенциальная возможность количественной оценки вертикальных размеров незаложенного пространства по периоду экстремумов амплитудного спектра вплоть до мощности менее 1 м [4].

Аналогичный подход реализуется при контроле межштрекового пространства (рис. 1). Преимуществом сейсмоакустического просвечивания на отраженных волнах является возможность изучения массива при доступе только к одной горной

выработке и более точное определение скоростных характеристик за счет двойного прохождения волн через массив [6]. Использование сверхплотного шага наблюдений и цифровой обработки данных в рамках методики общей глубинной точки (ОГТ) позволяет не только выделять границы зон техногенной нарушенности в ближней зоне, но и участки, обусловленные естественными напряжениями [5, 6]. При регистрации колебаний с частотами 2,5–3 кГц длины волн составляют 1,3–1,6 м, что обеспечивает выделение объектов размерами 0,3–0,4 м, а при пределе разрешенности λ/8 – 0,15–0,2 м [6]. Исследования разновозрастных междукамерных целиков (1, 8 и 37 лет) показали, что вариации скоростей S-волн в целике достигают 30–35 % (Vs = 1650–2550 м/с), тогда как для P-волн не превышают 14–16 %, а границы зон нарушенности приконтурных частей отображаются пониженными значениями параметра γ = Vs/Vp. При этом с увеличением возраста целиков возрастает акустическая контрастность выделяемых зон по поперечным волнам, что отражает различную степень их разрушения и снижение несущей способности [6].

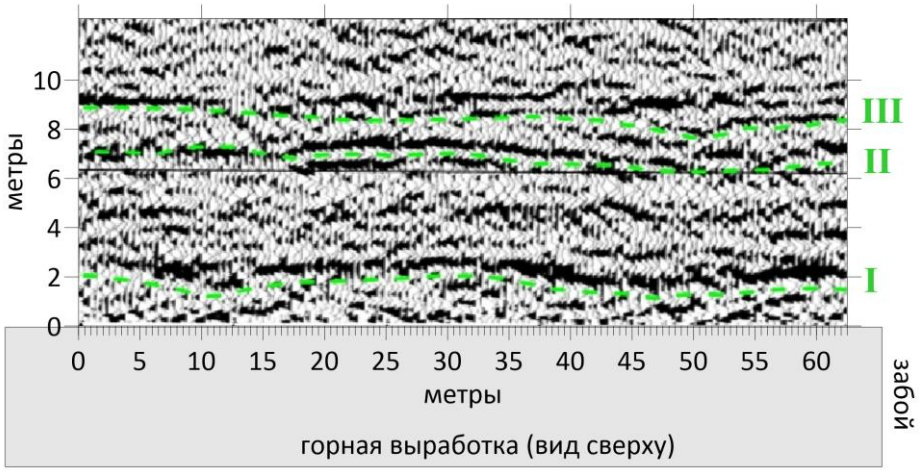


Рис. 1. - Сейсмический разрез P-волн в горизонтальной плоскости: I – отражение от ближней зоны влияния выработки; II – отражение от дальней зоны влияния выработки; III – отражение от стенки противоположной выработки

Для поиска локальных неоднородностей непосредственно в горизонтальной плоскости пласта также применим дифракционный подход, опробованный при локализации ствола ликвидированной разведочной скважины в охранном целике по наблюдениям из параллельного штрека [5, 7]. Объект с диаметром зоны влияния 0,36 м выделен на удалении 65 м, при этом, согласно оценкам, при доминирующей частоте 1000 Гц дифракционное проявление неоднородностей начинается с размеров 0,17 м для S-волн и 0,45 м для P-волн, а совпадение фокусов дифракции на разрезах волн обоих типов служит признаком идентификации объекта.

Выполненное полноволновое моделирование показало [8, 9], что при проходке камер повторной выемки может быть использована малоапертурная система сейсмической локации «Инсейс», размещаемая на почве выработки возле забоя. Технология использует поперечные волны, базируется на тех же принципах дифракционного суммирования и обеспечивает опережающую локацию контрастных объектов на удалении до 100–120 м с погрешностью ±2,0–2,5 м.

Также контроль структуры техногенного пласта, сложенного частично забутовкой, частично породами первичных целиков, возможен из нижележащей выработки низкочастотным ультразвуковым томографом [10]. Его опробование на

ВКМС показало выделение дальней границы целика на удалении до 6 м и зоны максимальной нарушенности в пределах первого метра от контура (рис. 2). Это согласуется с выводом о том, что количественная оценка степени изменения состояния междукамерных целиков связана с применением высокочастотных акустических методов, обеспечивающих наибольшую детальность скоростных характеристик волновых полей [6].

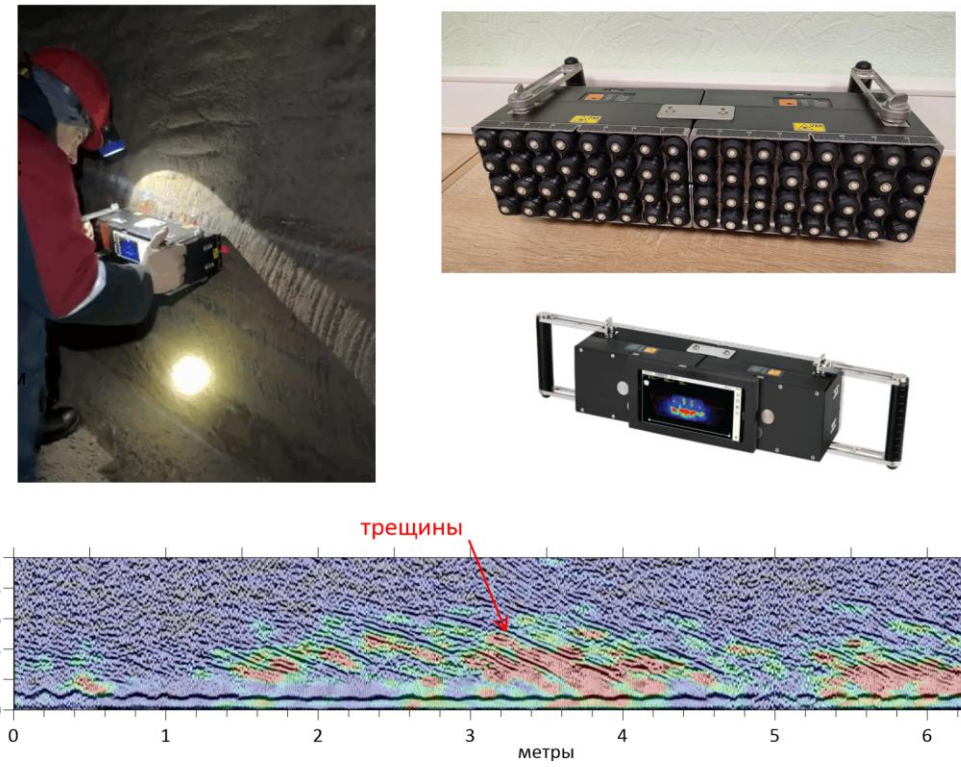


Рис. 2. - Результаты опробования ультразвукового томографа A1040 MIRA 3D PRO при просвечивании целика

Анализ производственного архива данных шахтной сейсморазведки по 5 рудникам показал, что преобладающие длины волн в условиях соляных пород (λS = 2,1 м, λP = 3,8 м) сопоставимы с поперечными размерами забутованных камер (основание 3–4 м) и в 2–4 раза меньше межосевого расстояния (9 м), поэтому периодическое строение целевого техногенного пласта должно формировать интенсивное рассеянное волновое поле, а результаты наблюдений будут зависеть от схемы возбуждения и характеристик направленности источников [11, 12]. В реальных условиях горных выработок наиболее надежно будут выделяться полости и зоны нарушенности с размерами, превышающими четверть длины волны, а для их однозначной идентификации необходимо совместное использование волн разных типов [6].

Таким образом, при повторной отработке природно-техногенного пласта целесообразна организация геофизического мониторинга, ориентированного на выявление остаточных полостей, зон разуплотнения и трещиноватости в забутованных камерах и на контроль состояния вновь формируемых неоднородных междукамерных целиков. Рекомендуемый комплекс включает профилирование ОГТ из выработок смежных горизонтов на этапе подготовки участка, опережающую сейсмическую локацию на основе системы «Инсейс» в процессе проходки камер

повторной выемки, ультразвуковую томографию для мониторинга приконтурной зоны целиков.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.7.3.

Литература

1. Барях А.А., Бельтюков Н.Л., Самоделкина Н.А., Токсаров В.Н. Обоснование возможности повторной отработки запасов калийных руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 3. – С. 85–97. – DOI: 10.15372/FTPRPI20200309.
2. Иванов С.В., Ярославцев А.Г., Ермашов А.О. Полноволновое моделирование сейсморазведочного контроля процесса гидрозакладки выработок с разной степенью устойчивости // Инженерная и рудная геофизика 2023: материалы конференции. – Санкт-Петербург, 2023.
3. Иванов С.В., Ярославцев А.Г., Никифорова А.И. Сейсморазведочный контроль процесса гидрозакладки горных выработок // Инженерная и рудная геофизика 2024: материалы конференции. – 2024.
4. Санфиров И.А., Байбакова Т.В., Тарантин М.В., Кузнецов И.Л., Иванов С.В. Влияние закладки горной выработки на параметры отраженных волн // Инженерная и рудная геофизика 2025: материалы конференции. – Екатеринбург, 2025.
5. Бабкин А.И., Санфиров И.А. Сейсморазведочный прогноз литологических неоднородностей в горизонтальной плоскости межштрекового пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 11. – С. 55–60.
6. Бабкин А.И. Шахтная сейсмоакустика по методике многократных перекрытий (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): дис. … канд. техн. наук: 25.00.16 / Горный институт УрО РАН. – Пермь, 2001. – 156 с.
7. Бабкин А.И., Санфиров И.А. Локализация ствола скважины в пределах охранного целика на уровне продуктивных пластов калийного рудника методом сейсмоакустического профилирования ОГТ в горизонтальной плоскости // Инженерная и рудная геофизика 2021: материалы конференции. – Геленджик, 2021.
8. Ярославцев А.Г., Тарантин М.В. Методика сейсмоакустического контроля структуры околозабойного массива в соляных рудниках // Инженерная и рудная геофизика 2025: материалы конференции. – Екатеринбург, 2025. – С. 290–295.
9. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Бобров В.Ю. Сейсмоакустический контроль массива при подземном строительстве // Мониторинг состояния сооружений и оснований: диагностика, оценка и прогнозирование: материалы конференции. – Сириус, 2025.
10. Бобров В.Ю. Возможности применения низкочастотного ультразвукового томографа для контроля состояния породного массива межкамерных целиков // Горное эхо. – 2024. – № 2. – С. 23–32. – DOI: 10.7242/echo.2024.2.5.
11. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И. Изучение особенностей формирования поля отраженных волн при наблюдениях в горных выработках соляных рудников на основе полноволнового моделирования // Геофизика. – 2021. – № 5. – С. 4–11.
12. Ярославцев А.Г. Обоснование сейсмогеологической модели выработанного пространства для разнотипных волновых полей // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 103–108. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.19.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА В ЖИДКОСТЯХ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ГИДРО- И СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ, РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИИ

Уваров С.В., Ефремов Д.В., Баяндин Ю.В., Никитюк А.С, Князев Н.А., Наймарк О.Б

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

В [1] в соответствии с результатами оригинальных экспериментальных исследований о квазипластических механизмах переноса импульса в жидкостях развита модель, в которой механизмы молекулярной релаксации (время релаксации Френкеля) определяется структурными перестройками, определяемыми видом установленного потенциала свободной энергии с множественнными метастабильными состояниями.

Коллективные молекулярные перестройки локализованного сдвига, обусловленные метастабильностью потенциала, определяют активационный барьер при формировании ансамбля ориентированных сдвигов, имеющего признаки неравновесного критического явления – ориентационные переходы. Кинетика переходов определяется временами Френкеля, следующего из кинетического уравнения для ансамбля сдвигов, учитывающего множественные метастабильные состояния. Полученное время релаксации вводится в гидродинамическое описание типа Максвелла, которое связывает структурную кинетику с вязкостью, числом Деборы и возникновением «щелевого механизма» переноса импульса (gapped momentum).

Развитие локализованных сдвигов ассоциируется с проявлениями гидро- и сонолюминесценции. Ранее были проведены экспериментальные исследования явлений гидро- и сонолюминесценции при пропускании гидравлического масла через узкий канал. В развитие этих экспериментов а так же применяя методику [2] были проведены работы по исследованию возникновения кавитации в закрытой полости форсунки авиационного двигателя. В ходе работ было установлено, что температура и внешнее давление оказывают существенное влияние на инициацию кавитации и возникновение гидролюминесценции. На данный момент проводится подготовка к модельным экспериментам по исследованию влияния температуры с целью уточнения модельных представлений

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.8.1

Литература

1. Aleksandr S. Nikitiuk, Yuriy V. Bayandin, Oleg B. Naimark; Structurally controlled Frenkel relaxation time in liquids. Physics of Fluids 1 August 2026; 38 (8): 083113. https://doi.org/10.1063/5.0344356

2. Патент № 2858812 C1 Российская Федерация, МПК G01N 21/27, G01N 21/31, G01N 21/954. Устройство для измерения интенсивности кавитации в закрытых непрозрачных полостях : заявл. 18.09.2025 : опубл. 24.03.2026 / С. В. Уваров ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук. – EDN TGPOJN.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КРИТИЧНОСТИ СТАДИЙНОСТИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ОПТОАКСТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Банников М.В., Уваров С.В., Баяндин Ю.В.,Савельева Н.В., Наймарк О.Б.

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

Акустическая эмиссия как метод диагностики с использованием пьезоэлектрических датчиков (ПЭД) и волоконно-оптических (ВО) датчиков позволяет обнаруживать сигнал, излучаемый дефектами [1]. Данная работа посвящена развитию методов неразрушающего контроля для прогнозирования критических состояний и разрушения композитных материалов. Целью является обнаружение признаков самоорганизованной критичности (СОК) [2] и определение стадийности перехода от накопления повреждений к макроскопическому разрушению[3]. Для этого предлагается комплексный подход, объединяющий совместное использование пьезоэлектрических (ПЭ) и волоконно-оптических (ВО) распределённых датчиков, датчиков акустической эмиссии (АЭ) и системы корреляции цифровых изображений.

Методика и экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились на плоских образцах из углепластика, изготовленных методом автоклавного формования. Ключевой особенностью является интеграция волоконно-оптических линий (диаметром 0,2 мм) непосредственно в структуру композита между слоями углеродной ткани (Рис.1,а).

Экспериментальный комплекс включал:

- Электрорезонансная испытательную машину Testronic-50; Сервогидравлическая универсальаня испытательная машина Biss-100.
- Система акустической эмиссии AMSY-6 (Vallen).
- Оптоволоконный интерферометр с фотодетектором и осциллографом.
- Система цифровой корреляции изображений (DIC) LaVision для контроля полей деформаций.

Запись сигналов велась с частотой дискретизации 2 МГц по трем каналам: сигналы на первом и втором каналах получены с помощью пьезоэлектрических преобразователей, а на третьем канале — с помощью волоконно-оптического датчика. Использовался метод регистрации событий по амплитудному порогу.

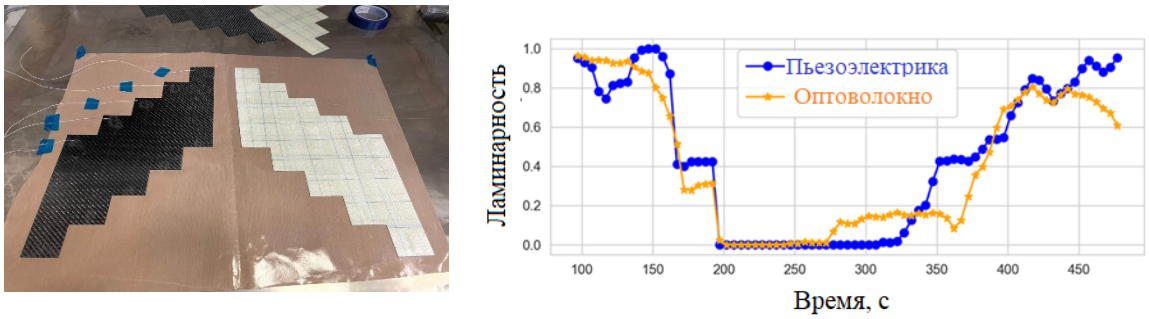
В дополнение к базовым испытаниям был проведен эксперимент на образцах с отверстием, служащим концентратором напряжений. Целью данного этапа являлось исследование влияния неоднородности поля напряжений на кинетику накопления повреждений и характер акустической эмиссии.

Для контроля полей деформации в окрестности концентратора применялся комплексный подход: распределенный волоконный датчик, встроенный в композит, позволял получать пространственно-распределенные данные о деформации вдоль волокна. Система корреляции цифровых изображений (DIC) обеспечивала бесконтактное измерение полей перемещений и деформаций на поверхности образца. Датчики акустической эмиссии регистрировали сигналы, генерируемые процессами микроразрушения в зоне концентратора. Совместный анализ данных DIC, распределенного волоконного датчика и АЭ позволил установить корреляцию между локальными деформационными процессами в вершине концентратора и параметрами акустических сигналов. Это дало возможность более точно идентифицировать момент перехода от рассеянного накопления микроповреждений к образованию магистральной трещины.

Обработка данных и анализ

Для анализа временных рядов АЭ применялись методы кластерного и мультифрактального анализа, а также рекуррентный количественный анализ (RQA) [4]. Основное внимание уделялось параметру ламинарности, позволяющему выявлять критические точки в развитии поврежденности. Ламинарность — это мера того, как долго система находится в неизменном или медленно меняющемся состоянии. Высокая ламинарность указывает на наличие длительных пауз в динамике, что часто связано с переходом системы в критические или локализованные состояния» [4].

Установлено, что функция распределения энергии акустических импульсов подчиняется степенному закону в широком диапазоне значений (около 4 порядков величины). Распределение временных интервалов между событиями также близко к степенному закону, что является характерным признаком нелинейных динамических систем и самоорганизованной критичности. Рассчитанный по данным для разных каналов параметр ламинарности, показал наличие двух критических точек, определяющих переходы между характерными стадиями развития поврежденности (рис. 1, б)



а) б)

Рис. 1 – а) Этап технологического процесса изготовления образцов с оптоволокном. б) Результаты анализа RQA акустических сигналов в зависимости от параметра ламинарности и времени. Плато демонстрирует наличие критических точек, разделяющих стадии повреждения и разрушения.

Основные результаты

Анализ данных выявил наличие двух критических точек, разделяющих стадии развития повреждений в композите:

1. Первая критическая точка связана с переходом к ориентационно выраженным коллективным модам (очагам) поврежденности.
2. Вторая критическая точка соответствует модам локализации поврежденности и является предвестником зарождения макроскопических трещин.

Параметр ламинарности, рассчитанный методом RQA, демонстрирует плато, четко разделяющие эти стадии. Показано, что данные, полученные с помощью волоконно-оптического датчика, согласуются с данными пьезоэлектрических преобразователей, что подтверждает эффективность оптоакустического метода для диагностики.

Выводы

Предложенный оптоакустический метод, основанный на совместном использовании пьезоэлектрических и встроенных волоконно-оптических датчиков, позволяет с высокой точностью идентифицировать стадии разрушения композитных материалов. Установленные закономерности критичности (степенные законы распределения энергии и временных задержек [3]) и наличие двух критических точек дают возможность прогнозировать переход от рассеянного накопления повреждений к локализованному разрушению в широком диапазоне интенсивностей нагружения, включая ударно-волновые воздействия [5].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.8.2.

Литература

1. Chen, Z., Ansari, F. 2000. Fiber optic acoustic distribution crack sensor for large structures, Journal of Structural Control, 7, 1, 119–120. DOI: 10.1002/stc.4300070108
2. Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K. 1987. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. Physical Review Letters, 59, 4, 381–384. DOI: 10.1103/PhysRevLett.59.381
3. Naimark, O.B. 2004. Defect Induced Transitions as Mechanisms of Plasticity and Failure, In Multifield Continua, Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure, Capriz, G. and Mariano, P., (Eds.), Birkhäuser, Boston, 75–114. DOI: 10.1007/978-0-8176-8158-6_4
4. Marwan, N. and Webber, C.L. 2015. Recurrence quantification analysis: Theory and best practices, Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-07155-8
5. Bing Lyu, Yongxing Shen, Oleg Naimark. Large deformation phase field modeling of spallation in metallic materials induced by laser shock peening// Engineering Fracture Mechanics 345 (2026) http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.6429812

ГЕНЕРАЦИЯ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННЫХ И ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Колесниченко И.В., Озерных В.С., Халилов Р.И.

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

Наличие электрического тока и магнитного поля в электропроводящей среде приводит к появлению в среде электромагнитной (ЭМ) силы, которая приводит жидкий металл в движение. Зачастую для создания электромагнитной силы применяется вращающееся магнитное поле (ВМП) [1], поскольку оно сразу создает азимутальную компоненту ЭМ силы. Однако такой способ имеет ряд ограничений, например возникновение электромагнитных помех, влияющих на работу оборудования.

Альтернативой ВМП может выступать закрутка потока с помощью постоянных магнитных полей. Постоянное магнитное поле может как стабилизировать течение, так и приводить к его флуктуациям [2, 3]. Расчеты показали возможность осуществления бесконтактной закрутки транзитного потока жидкого металла в цилиндрическом канале с помощью совокупности постоянных магнитных полей.

В математической модели используются три различных источника магнитного поля. Первый – катушки Гельмгольца, создающие магнитное поле B_1 поперек оси канала. Второе магнитное поле с индукцией B_2 создается парой стержней вблизи стенок, по которым течет электрический ток. Еще одно магнитное поле с индукцией B_3 создается протеканием электрического тока поперек канала. Ток может протекать либо по жидкому металлу и подводиться с помощью контактов к стенке канала, либо по тонкому стержню.

Расчеты показали, что под действием магнитных полей B_2 и B_3 действительно возникает закрученное движение жидкого металла в цилиндрическом канале. Слабое магнитное поле $B_2 = 0.1$ Тл при отсутствии поля B_3 создает азимутальное вращение жидкости, локализованное в пристеночной области (рис. 1а). Увеличение магнитного поля до величины $B_2 = 0.7$ Тл приводит к возмущениям азимутальной скорости вблизи стенок канала (рис. 1б).

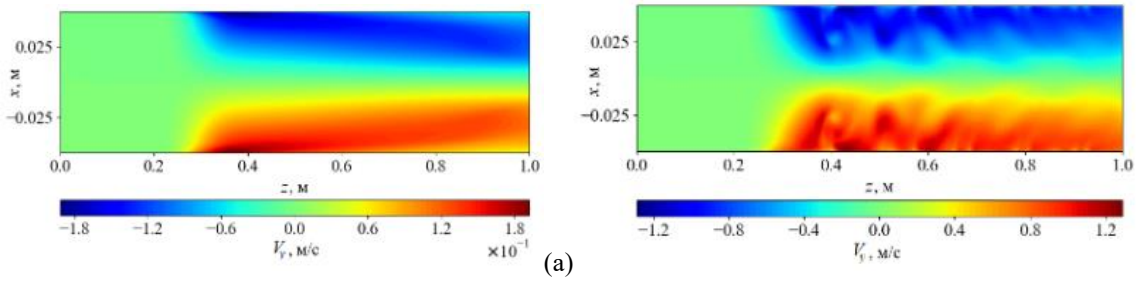


Рис. 1. - Мгновенные поля компоненты скорости V_y в осевом сечении: (а) – $B_2 = 0.1$ Тл, (б) – $B_2 = 0.7$ Тл

Обнаружено, что в узком диапазоне параметров (при B_2 = 0.15 Тл B_3 = 0.10 Тл) существует режимы, в которых разделяется закрутка потока на оси канала от закрученной периферии. На рис. 2 построена картина тангенциальной скорости потока. Синим цветом обозначена закрутка против часовой стрелки (отрицательная), красным цветом – закрутка по часовой стрелке (положительная). Величина закрутки на периферии при одинаковых магнитных полях на порядок превосходит величину осевой закрутки потока.

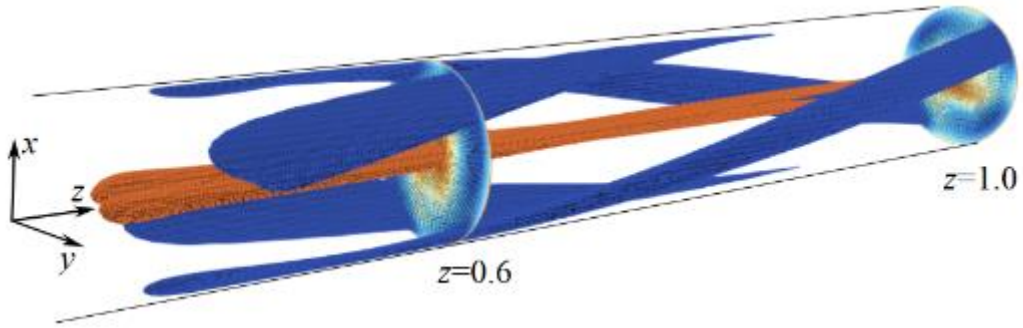


Рис. 2. - Иллюстрация изоповерхности поля тангенциальной скорости при B_2 = 0.15 Тл, B_3 = 0.10 Тл. Синим цветом показано вращение против часовой стрелки, красным - по часовой

Действие магнитных полей B_2 и B_3 по-отдельности приводит к закрутке транзитного течения, при этом частота вращения растет с ростом величины магнитного поля. Действие поля B_2 при тех же значениях приводит к более интенсивной закрутке, чем B_3. Действие вращающих сил в одну и ту же сторону в целом усиливает общее вращение потока, что проявляется в увеличении частоты. Результат воздействия сил, направленных в разные стороны, зависит от соотношения их интенсивности. Наиболее интересный режим, в котором осевая часть течения закручена в одну сторону, а периферийная в другую, возникает в достаточно узком диапазоне значений полей. В других конфигурациях происходит либо доминирование осевой закрутки, либо периферийной. В этих режимах течение распадается на несколько струй, закрученных в разные стороны, при этом сами эти струи расположены на спиральных траекториях.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.9.1.

Литература

1. Kolesnichenko I., Ozernykh V. Interaction between counter-rotating azimuthal and axial liquid metal flows in cylindrical channel // Physical Review Fluids. 2025. Vol. 10. P. 113701. https://doi.org/10.1103/7bs3-xt8t
2. Listratov Y., Razuvanov N., Belyaev I., Sviridov E. Dynamics of submerged jet flow in a pipe in a longitudinal magnetic field // Computational Continuum Mechanics. 2023. Vol. 15, no. 4. P. 480–494. https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.4.37
3. Belyaev I., Pyatnitskaya N., Luchinkin N., Krasnov D., Kolesnikov Y., Listratov Y., Mironov I., Zikanov O., Sviridov E. Flat liquid metal jet affected by a transverse magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2021. Vol. 57, no. 2. P. 211–222. https://doi.org/10.22364/mhd.57.2.6

ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ СРЕД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Окатьев Р.С., Фрик П.Г., Шестаков А.В., Полуянов А.О.

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

Жидкие металлы находят широкое применение в разных областях промышленности, например в металлургии и атомной энергетике. Важнейшей особенностью жидких металлов является их высокая электропроводность. Это позволяет создавать течение среды и контролировать его характеристики бесконтактным способом [1].

В большинстве интересных с точки зрения приложений течений жидких металлов среда является неоднородной. В качестве неоднородности могут выступать оксиды металлов, электропроводность которых значительно отличается от электропроводности жидкости. Другой причиной появления неоднородности могут быть сильные градиенты температуры, которые, в частности, наблюдаются при сложных течениях жидких металлов в теплообменниках термоядерных реакторов [2].

Наличие примеси или температурных неоднородностей приводит к тому, что свойства среды становятся локально неоднородными. Это может оказывать влияние характеристики течения среды [3] и его устойчивость. В работе исследуется влияние неоднородности электропроводности жидкости на устойчивость транзитного течения в канале между двумя параллельными стенками. Магнитное поле полагается однородным и действующим перпендикулярно стенкам канала. Предполагается линейная зависимость электропроводности от температуры. На стенках канала для температуры ставятся условия первого рода, обеспечивающие постоянный градиент температуры в стационарном случае. Так как целью работы является выявление влияния неоднородности электропроводности действием силы плавучести пренебрегается.

Получена система уравнений спектрально-амплитудной задачи линейной устойчивости, обобщающая классическую систему Орра-Зоммерфельда-Сквайра. Управляющими параметрами задачи являются число Рейнольдса Re, число Гартмана Ha, число Прандтля Pr и безразмерный коэффициент температурной зависимости электропроводности $\varkappa$. Спектрально-амплитудная задача решалась спектральным методом, реализованным с помощью программного комплекса Dedalus [4].

Результаты решения задачи линейной устойчивости позволили обнаружить длинноволновую неустойчивость, развивающуюся при $\varkappa>0.5$. Эта неустойчивость связана с наличием точки перегиба в профиле скорости [5]. Наиболее опасные возмущения скорости представляют собой поперечные вихревые структуры, локализованные вблизи точки перегиба. Возмущения температуры также оказываются локализованными вблизи точки перегиба, причем область локализации существенно уменьшается с увеличением числа Прандтля (рис. 1). Скорость роста наиболее опасных возмущений немонотонным образом зависит

от Pr и выходит на асимптотические режимы в пределах малых и больших значений числа Прандтля (рис. 2).

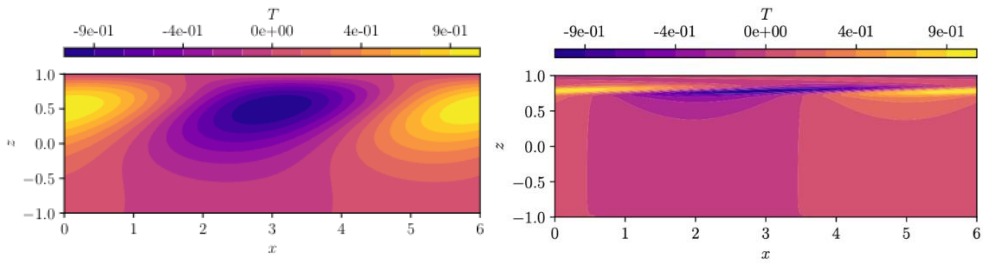


Рисунок 1. Поля возмущений температуры, соответствующие наименее устойчивой моде при Ha=50, Re=25000, $\varkappa$=0.7 для значений числа Прандтля Pr=10^{-3} (слева) и Pr=1 (справа)

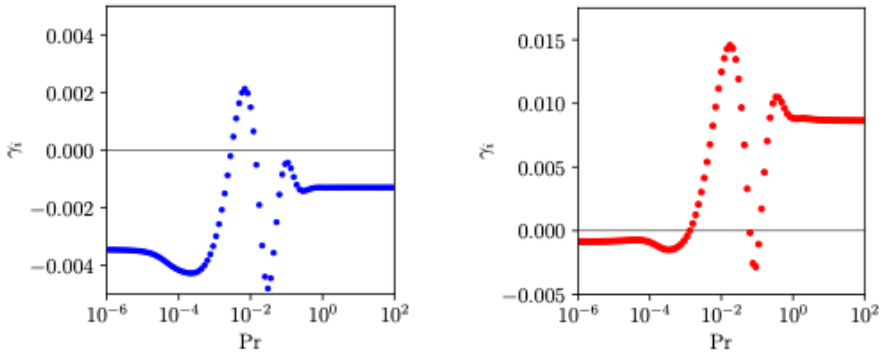


Рисунок 2. Зависимости скорости роста возмущений от числа Прандтля при двух наборах параметров: Ha=50, Re=75000, $\varkappa$=0.6 (слева) и Ha=50, Re=17500, $\varkappa$=0.7 (справа)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.9.2.

Литература

1. Davidson P.A. Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 555 p.
2. Zikanov O., Belyaev I., Listratov Y., Frick P., Razuvanov N., Sviridov V. Mixed Convection in Pipe and Duct Flows with Strong Magnetic Fields // App. Mech. Rev. 2021. Vol. 73, N. 1. P. 010801. https://doi.org/10.1115/1.4049833
3. Окатьев 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. https://doi.org/10.14529/mmph230304
4. Burns K.J., Vasil G.M., Oishi J.S., Lecoanet D., Brown B.P. Dedalus: A flexible framework for numerical simulations with spectral methods // Phys. Rev. Research. 2020. Vol 2. P. 023068. https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.023068
5. Okatev R., Zikanov O., Krasnov D., Frick P. Inflection point instability in Hartmann channel flow with variable electric conductivity // Phys. Fluids. 2026. Vol. 38. P. 044104. https://doi.org/10.1063/5.0319437

ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ ПОТОКА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Лосев Г.Л., Ельтищев В.А.

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

Жидкие металлы обладают рядом уникальных физических свойств: их высокая тепло- и электропроводность обусловливают особые характеристики теплопередачи и наличие дополнительных механизмов генерации объемных движущих сил. Это одна из основных причин их использования в качестве теплоносителей в определенных типах современных энергетических установок – как действующих, так и находящихся на стадии разработки. Важной особенностью жидких металлов является то, что молекулярный перенос тепла происходит во много раз интенсивнее, чем молекулярный перенос количества движения. Поэтому даже в турбулентном потоке расплавленного металла молекулярная теплопроводность вносит определяющий вклад в радиальный теплоперенос не только в пристеночном слое, но и в ядре потока [1]. Высокая теплопроводность жидких металлов также обеспечивает значительные коэффициенты теплоотдачи (по сравнению с водой или парогазовой смесью) и малые перепады температур между теплоносителем и поверхностью трубопровода [2]. Это способствует проникновению температурных пульсаций вглубь стенок канала.

Циклические изменения температуры могут приводить к усталости металла (снижению прочности элементов технологического оборудования, вызванному постепенным накоплением повреждений и разрушением материала [2, 3]). Температурные колебания могут возникать в зонах ввода локальных струй с отличной от основного потока температурой, при смешении потоков с разными температурами, а также в местах наличия препятствий (например, в измерительных приборах и трубопроводной арматуре). Проблема термоциклической усталости металлов остается крайне актуальной для аэрокосмической и атомной отраслей, поскольку разрушение затрагивает компоненты, критически важные не только с точки зрения материальных ресурсов, но и с точки зрения безопасности людей. В атомной промышленности проблема термоциклической усталости возникает в трубопроводах, транспортирующих теплоноситель. Локальные температурные неоднородности на стенке трубопровода, а также в зоне смешения теплоносителей с различными температурами, создают риск разрушения трубопровода и разгерметизации системы охлаждения АЭС [4]. В связи с этим изучение процессов смешения потоков с целью предотвращения термоциклической усталости остается чрезвычайно важной задачей.

Данное исследование посвящено изучению взаимодействия контрвихревых течений с транзитным потоком, а также их влияния на перенос температурных неоднородностей в канале с жидкометаллическим теплоносителем. Целью работы является определение бесконтактных методов выравнивания температурных неоднородностей в потоке жидкого металла и управления температурными пульсациями.

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый контур, заполненный жидким металлом и оснащенный насосом, расходомером, а также датчиками давления и температуры для контроля усредненных характеристик потока. Контур включает в себя измерительный канал – участок трубопровода, имеющий большее сечение по сравнению с основным трубопроводом контура. Это сделано для обеспечения более высокого пространственного разрешения датчиков, а также для того, чтобы габариты экспериментального участка лучше соответствовали типичным трубопроводам контуров охлаждения АЭС. Внутренний диаметр канала составляет $2R = 100$ мм, а длина прямолинейного участка $L = 800$ мм. Вокруг канала размещены два индуктора, создающих вращающееся магнитное поле (ВМП); они имеют независимое питание и подключены таким образом, чтобы генерировать электромагнитные силы, действующие в противоположных направлениях. Канал оснащен трехточечной термопарой и тремя датчиками ультразвукового доплеровского анемометра (УДА). На поверхности канала, посередине между индукторами ВМП, размещается нагреватель диаметром 5 мм. Нагреватель создает локальную температурную неоднородность, которая распространяется в жидкости посредством вынужденных вихревых течений. Температурные пульсации регистрируются с помощью трёхточечной термопары. На протяжении всей серии экспериментов температура нагревателя поддерживается на уровне 300°C при мощности примерно 120 Вт.

Математическая модель основана на уравнениях магнитной гидродинамики, описывающих взаимодействие электрических и магнитных полей с движущимися проводящими средами. Первое определяющее уравнение описывает перенос магнитного поля движущейся проводящей жидкостью; оно выводится из уравнений Максвелла и закона Ома для движущихся сред. Два других определяющих уравнения – это уравнение Навье-Стокса, включающие член, отвечающий за электромагнитную силу, и уравнение неразрывности.

Без влияния магнитного поля создаваемая у стенки неоднородность температуры переносится потоком и постепенно рассеивается без возникновения колебаний. Результаты исследования показали, что существуют моды, приводящие к температурным флуктуациям. Эти колебания вызваны формированием специфических гидродинамических процессов в конфигурации с двумя противоположно направленными магнитными полями. Влияние этих полей на жидкий металл приводит к генерации различных типов гидродинамических структур в зависимости от соотношения интенсивностей магнитных полей.

Обнаруженные режимы течения существенно влияют на поведение температурных неоднородностей в транзитном потоке, которые образуются в пристеночном слое. В ядре потока в большинстве мод возникают устойчивые низкочастотные (10^{-1}–1 Гц) колебания скорости. Расчеты показывают, что расчетная частота оборота полоидального вихря и среднемасштабных вихрей составляет порядка 10^{-2} Гц. Следовательно, пульсации на частотах 10^{-1} Гц, скорее всего, вызваны мелкомасштабными неустойчивостями, возникающими в потоке.

Важным результатом является отсутствие выраженных температурных колебаний в пристеночной области, даже когда в ядре потока формируются стабильные температурные колебания. Это связано с упомянутым выше переносом температурной неоднородности от стенки к ядру потока, чего наиболее эффективно можно достичь с помощью противоположно направленных ВМП. Разработка методов подавления температурных колебаний в пристеночных областях важна для

предотвращения термоциклической усталости. При отсутствии специального контроля температурная неоднородность в потоке жидкометаллического теплоносителя (вне зависимости от причины её возникновения) может генерировать температурные пульсации [5] в частотном диапазоне, наиболее опасном с точки зрения термоциклических напряжений [6]. Локализованные струйные потоки, обнаруженные в этом исследовании, создают стабильную теплопередачу за счет радиального колебательного движения жидкости. Это наиболее значимый фактор в подавлении температурных неоднородностей на стенках трубопроводов [6]. Низкочастотные гидродинамические пульсации в ядре потока обеспечивают эффективное рассеивание температурных неоднородностей внутри основной массы жидкости. Создание таких течений в областях, где смешиваются потоки металлического теплоносителя с разными температурами, может значительно продлить срок службы чувствительных компонентов атомных электростанций за счет снижения воздействия термомеханической усталости. Таким образом, карты режимов, полученные в данном исследовании, позволяют выбрать соответствующий тип воздействия для описанных практических применений.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.9.3.

Литература

1. Kutateladze S.S. Liquid-Metal Heat Transfer Media. New York: Springer, 2013.Cosserat E.F. Theorie des corps deformables. Paris: Librairie Scientique A. Hermann et Fils, 1909. 226 p.
2. Yiming Zheng, Bingbing Li, Jingwei Zhao, Caiming Liu, Takamoto Itoh, and Xu Chen. Thermomechanical and isothermal fatigue crack propagation testing method for 316ln austenitic stainless steel // Fatigue; Fracture of Engineering Materials and Structures, 2022. Vol. 45, No.10. P. 3040–3052.
3. Zuchowski R. Analysis of the thermal fatigue process // Journal of Materials Processing Technology, 2000. Vol. 106, No. 1–3. P. 167–172.
4. Validation of fast reactor thermomechanical and thermohydraulic codes. Final report of a co-ordinated research project 1996–1999. IAEA, Vienna, 2002.
5. Kolesnichenko I.V., Khalilov R.I., Shestakov A.V., Krylov A.N., Pakholkov V.V., Pavlinov A.M., Mamykin A.D., Vasiliev A.Yu., Rogozhkin S.A., Frick P.G. Mixing of different temperature flows of liquid sodium in the pipeline behind the tee // Thermal Engineering, 2023. Vol. 70, No.3. P. 203–209.
6. Takashi Takata, Takeshi Fukuda, Akira Yamaguchi, Akihiro Uchibori, Nobuyuki Kimura, Hideki Kamide. Numerical study on passive control of thermal striping phenomenon using Lorentz force in fast reactor // In 18th International Conference on Nuclear Engineering, 2010. Vol. 4, Parts A and B. P. 1125–1131.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТЕПЛООБМЕН В ТРАНЗИТНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

Митрополит И.Ю., Мамыкин А.Д.

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

Применение электромагнитных сил для воздействия на неизотермические процессы в жидких металлах является одной из наиболее интересных задач магнитной гидродинамики, что связано с широким использованием жидких металлов в современных энергетике и металлургии. Жидкие металлы применяются в качестве теплоносителя в системах теплообмена на атомных электростанциях с реакторами на быстрых нейтронах [1].

Ключевой задачей в таких процессах является повышение эффективности теплообмена. Одним из основных способов является создание в потоке вторичных течений. Существует несколько подходов к повышению эффективности теплообмена за счет создания дополнительных течений. Использование таких элементов модификации поверхности канала, по которому движется металл, как ребра [2], препятствия [3] и лунки [4], позволяет увеличить интенсивность теплообмена. Однако высокие рабочие температуры и химическая активность жидких металлов предъявляют жесткие требования к прочности стенок канала и ограничивают применение многих подобных модификаций. Представляется рациональным создавать вторичные течения обладающего высокой электропроводностью жидкого металла бесконтактно при помощи магнитного поля. Цель данной работы – интенсификация охлаждения потока жидкого металла в цилиндрическом канале за счет закрутки потока, обеспечиваемой бесконтактным созданием электромагнитных сил.

Рассматривались два типа каналов: канал постоянного диаметра D по всей длине и канал переменного диаметра. В обоих случаях жидкий металл движется по каналу от входного участка к выходному. Канал переменного диаметра имеет диаметр d на входном и выходном участках, а в основной части имеет диаметр D. Основной канал соединен с входным и выходным участками посредством расширяющегося (диффузор) и сужающегося (конфузор) участков. Вращение потока создается источником вращающегося магнитного поля (ВМП). Оно индуцирует в проводящей среде электромагнитную силу, направленную преимущественно по азимуту, и приводит эту среду в движение.

Математическая модель основана на системе уравнений магнитной гидродинамики в электродинамическом приближении. Для решения электродинамической части задачи используется система уравнений Максвелла без токов смещения, дополненная законом Ома. Для решения гидродинамической задачи используются уравнения Навье-Стокса и уравнение неразрывности, для решения тепловой задачи вводится уравнение для энергии. Интенсивность действия ВМП описывается числом Тейлора Ta, а эффективность теплоотдачи – числом Нуссельта Nu. Турбулентность течения учитывается в рамках модели k-ω SST. Гидродинамическая задача решается в пакете Ansys Fluent.

Электродинамическая – в Ansys EMAG. Математическая модель валидирована по данным эксперимента.

По результатам трехмерных расчетов показано, что закрутка потока жидкого металла внутри цилиндрического канала позволяет усилить теплоотдачу во внешнюю среду. Обнаруженный механизм основан на генерации мощного азимутального потока, который создает вторичные полоидальные вихри. Эти вихри интенсифицируют радиальный теплоперенос из горячей осевой области. Эффективное охлаждение достигается за счет движения горячего жидкого металла преимущественно вблизи стенки канала, а не у его оси. Данный эффект обнаружен и в канале переменного диаметра для разных положений источника ВМП (рис. 1*а*) [5], и в канале постоянного диаметра (рис. 1*б*) [5], а также подтвержден экспериментально [5].

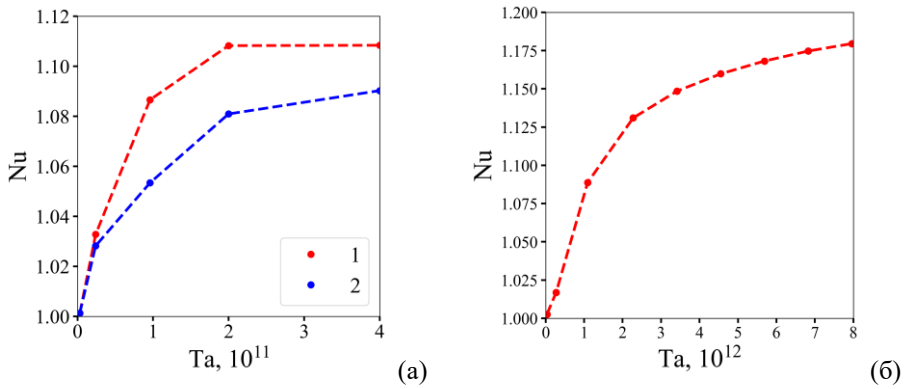


Рис. 1. - Зависимость Nu от Ta для канала переменного диаметра (*а*) для источника ВМП, расположенного близко к диффузору (*1*) и близко к середине канала (*2*); зависимость Nu от Ta для канала переменного диаметра (*б*)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.9.4.

Литература

1. Elmlinger L., Laube T., Dietrich B., Wetzel T. Experimental investigation of mixed convection in a horizontal tube for a liquid metal flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 2026. Vol. 260. P. 128495. https://doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128495
2. Belyaev I., Genin L., Krylov S., Novikov A., Razuvanov N., Sviridov V. Experimental investigations of heat transfer and temperature fields in models simulating fuel assemblies used in the core of a nuclear reactor with a liquid heavy-metal coolant // Therm. Eng. 2015. Vol. 62. P. 645-651. https://doi:10.1134/ S0040601515090025
3. Andreev O., Kolesnikov Y. Heat transfer promoted by cylindrical obstacles in magnetic field // Magnetohydrodynamics. 1995. Vol. 31. P. 391-396.
4. Isaev S.A., Chulyunin A.Y., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G., Usachov A.E. Analysis of the anomalous intensification of a separate flow and heat transfer in a stabilized section of a narrow channel with single-row, inclined, oval-trench dimples with the use of various grids and turbulence models // High Temp. 2021. Vol. 59. P. 106–114. https://doi:10.1134/ S0018151X21010041
5. Mitropolit I., Losev G., Eltishchev V., Kolesnichenko I. Impact of rotating magnetic field on liquid metal flow through cylindrical channel to increase heat exchange // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2026. Vol. 122. P. 110729. https://10.1016/j.ijheatfluidflow.2026.110729

СНИЖЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СЕРОВОДОРОДА В ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТКАХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Кузнецова Ю.Л.

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

При механизированной отработке калийных пластов в атмосферу тупиковых забоев выделяются сопутствующие газы, среди которых наиболее токсичным является сероводород (H_2S). В серии натурных наблюдений в тупиковых камерах длиной более 100 м [1, 2] зафиксировано пространственное снижение концентрации сероводорода по мере удаления вентиляционной струи от забоя к устью выработки (в ряде измерений спад достигает 15-25%). Для объяснения этого явления в литературе привлекается концепция самоочищения атмосферы за счет поглощения газа минеральной пылью ($NaCl$, KCl), генерируемой комбайном [2].

Вместе с тем физико-химические свойства каменной соли и сильвинита существенно отличаются от классических пористых сорбентов: они обладают малой удельной поверхностью ($S_{уд} \approx 0.1\text{-}0.5$ м^2/г) и плотной кристаллической решеткой. Целью настоящей работы является математическое моделирование поглощения H_2S увлажненным соляным аэрозолем, количественная оценка предельной сорбционной емкости пылевого облака в выработке и сопоставительный анализ возможных факторов наблюдаемого снижения концентрации.

Поведение соляной пыли во влажном воздухе определяется термодинамической точкой фазового перехода гигроскопичности (DRH составляет 75.3% для $NaCl$ и 84.5% для KCl). При типичной шахтной влажности ($RH \approx 55\text{-}70\%$) частицы находятся в субкритическом режиме ($RH < DRH$): их поверхность покрыта тонкой адсорбированной пленкой воды толщиной $\delta \approx 1.2\text{-}2.5$ нм (4-8 монослоев).

Ввиду высокой концентрации солей в приповерхностной пленке (насыщенный рассол, ионная сила $I \approx 4.5$ моль/л) растворимость газа снижается:

$$\lg(K_{H,0} / K_H) = k_s I, \quad K_H^* = K_H \left(1 + \frac{K_{a1}}{[H^+]}\right)$$

где $K_{H,0} \approx 0.1$ моль/(л·атм). Тогда эффективная растворимость составляет $K_H^* \approx 0.040\text{-}0.045$ моль/(л·атм).

Динамика диффузионного поглощения газа частицей радиусом r_0 описывается квазистационарным уравнением массопереноса с граничным условием Генри на внешней границе пленки. Численные расчеты показывают, что характерное время формирования гидратного слоя составляет $\tau_{гидр} < 10^{-4}$ с, а время насыщения пленки растворенным H_2S не превышает $\tau_{насыщ} \approx 10^{-3} - 10^{-2}$ с. Таким образом, частицы аэрозоля практически мгновенно приходят в фазовое равновесие с окружающей средой непосредственно в зоне работы комбайна.

Для масштабирования результатов на всю длину тупиковой камеры ($L = 100$ м, сечение $S \approx 10$ м^2, расход воздуха $Q = 200$ м^3/мин) выполнена интегральная оценка максимального поглощения при полидисперсном составе пыли ($d_{50} \approx 12$ мкм , запыленность $M_{\text{пыль}} = 600 - 1000$ мг/м^3). Расчеты показали, что объем жидкой фазы наноразмерных пленок, образующихся на частицах аэрозоля, крайне мал. Доля газа, потенциально связываемая аэрозолем, составляет $\sim 10^{-4}$-10^{-3}%. Вследствие чего вклад исключительно физического растворения сероводорода в объеме взвешенной пыли оказывается пренебрежимо малым по сравнению с общим объемом газовыделения.

Полученное расхождение между емкостью пылевого аэрозоля и наблюдаемым в натурных замерах [1-3] падением концентрации H_2S может быть связаны с утечками чистого воздуха вдоль вентиляционного трубопровода. Нормативный коэффициент утечек (1.07) закладывает падение концентрации на 7%, однако фактические утечки могут превышать данный показатель, заметно влияя на измеряемую концентрацию. Нестабильность работы комбайна также влияет на измеряемые значения концентрации газовой примеси. Особенно заметно это проявляется на показаниях концентрации, полученных в первой точке (вблизи забоя).

Результаты моделирования показывают, что физическая абсорбция сероводорода взвешенным соляным аэрозолем быстро насыщается и объясняет лишь малую часть наблюдаемого эффекта. Для корректной интерпретации динамики газовыделения необходимо комплексное рассмотрение аэродинамических факторов вентиляционной сети наряду с гетерогенными взаимодействиями на поверхности массива и отбитой руды.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.10.1.

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. Стариков А.Н. Снижение газообильности тупиковых горных выработок при разработке Верхнекамского калийного месторождения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2024. 24~с.

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ПАРОВ КРЕМНИЯ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО ВАКУУМА: ЭФФЕКТ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ТИГЛЕЙ

Демина Т.В., Коновалов В.В., Любимова Т.П.

«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. Исследование эффектов, связанных с вертикальным расположением тиглей друг над другом.

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. Улучшить этот процесс может вертикальное расположение тиглей друг над другом.

Физико-математическая модель

В работе используется модифицированное уравнение нелинейной диффузии [1]:

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

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

Нелинейное слагаемое $D_c \left(\nabla C\right)^2$ 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 с симметричным расположением вблизи внешней границы реторты наборов тиглей. Учитывается симметрия, а поэтому расчеты проводятся для сегмента (угол 60°) с периодическими граничными условиями, как показано на рисунке 1(а,б). Конфигурация включает набор от одного до четырех тиглей размером порядка 15,7 см×14 см в таком сегменте, расположенных на одинаковом расстоянии друг над другом, так что нижний тигель всегда находится на дне сегмента.

Граничные условия:

- На зеркале расплава постоянная концентрация $C = C_s$.

- На поверхности изделия $C = 0$ (полное поглощение).
- На стенках реторты задано условие непроницаемости.

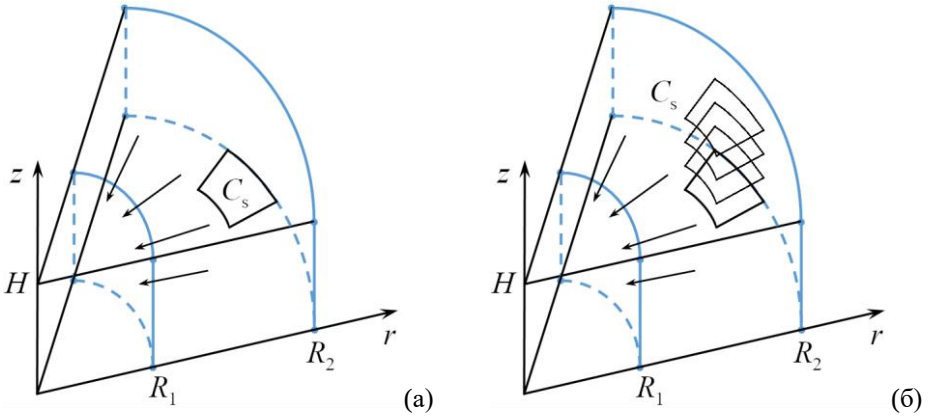


Рис. 1. - Схематическое изображение системы в трехмерной постановке с одним (а) и несколькими (б) тиглями. Стрелками изображен сходящийся поток паров кремния

Ранее проблема уже исследовалась для конфигурации с одним тиглем для реторты, имеющей форму параллелепипеда [1], а также для цилиндрической реторты, но только в осесимметричной постановке [2]. В [3] уже изучалась конфигурация, показанная на рисунке 1а, которая является частным случаем более сложной конфигурации, такой как на рисунке 1б. 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 51×61×21 до 101×121×41 узлов. Прочие параметры численного решения: радиусы домена $R_1 = 20$ см и $R_2 = 90$ см, высота реторты $H = 40$ см, а также $D = 0,7\ \text{м}^2/\text{с}$, $D_c = 52,8\ \text{м}^2/\text{с}$ и $C_s = 0,08$.

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. Так, на рисунке 2 показано стационарное распределение концентрации кремния C на высоте $h = 21$ см для конфигурации с четырьмя тиглями.

Основной практический результат – значения градиента концентрации (производной) на поверхности изделия. Представленные на рисунке 3 данные расчетов говорят о том, что с увеличением числа тиглей поток поступающего в изделие кремния возрастает, однако не пропорционально числу тиглей. Главное же, что профиль градиента концентрации кремния (и так достаточно ровный) еще более выравнивается с ростом количества задействованных тиглей.

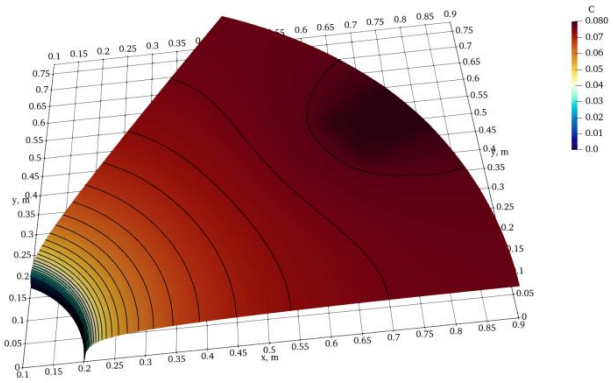


Рис. 2. - Стационарное распределение концентрации кремния на высоте 21 см для конфигурации с четырьмя тиглями

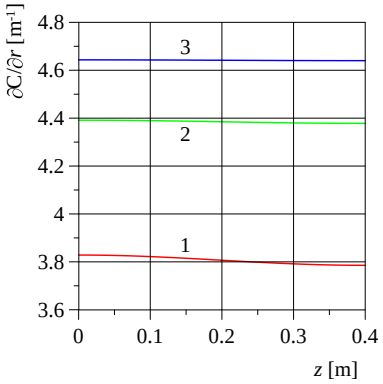


Рис. 3. – Профиль градиента концентрации кремния на поверхности изделия в зависимости от вертикальной координаты. Кривая 1 – конфигурация с одним тиглем. Кривая 2 – конфигурация с двумя тиглями. Кривая 3 – конфигурация с четырьмя тиглями

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.10.2.

Литература

1. 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
2. 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
3. Демин В.А., Демина Т.В., Коновалов В.В., Любимова Т.П.. Трехмерное численное моделирование процесса переноса паров кремния в условиях среднего вакуума в задаче с цилиндрической симметрией // Вычислительная механика сплошных сред. Принята к опубликованию 28.09.2026.
4. 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.
5. 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 ЗАГАЗОВАННОСТИ И ЗАПЫЛЕННОСТИ ВОЗДУХА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ РУДНИКОВ РАЗЛИЧНОЙ ТОПОЛОГИИ

Суханов А.Е., Левин Л.Ю., Мальцев С.В., Трушкова Н.А.

Горный институт УрО РАН

В работе обобщены результаты натурных исследований газовой и пылевой обстановки в выработках калийных рудников Верхнекамского, Гремячинского, Старобинского и Петриковского месторождений [1,2] и сформулированы направления совместного контроля газовых примесей и пыли. Основной целью работы являлось обоснование выбора мест и режимов измерений вредных примесей с учетом связности выработок, организации воздушных потоков и цикличности добычных процессов. Полученные данные показывают, что контроль вредных примесей на исходящей струе необходимо дополнять измерениями в призабойном пространстве, где формируются локальные максимумы концентраций примесей.

Различия топологии рассматриваются на уровне рабочих зон: сопоставляются тупиковые комбайновые выработки с нагнетательным проветриванием и очистные участки со столбовой системой разработки, включающие лаву, конвейерный, вентиляционный и транспортный штреки. Для очистных участков существенны также аэродинамические связи с выработанным пространством.

Методология натурных измерений на рудниках Старобинского и Петриковского месторождений включала отбор и обработку 465 проб рудничного воздуха в 112 забоях очистных и подготовительных комплексов. Применялись портативные газоанализаторы, индикаторные трубки и отбор проб мокрым способом с последующим анализом на хроматографах «Хромос ГХ 1000» и «Хроматек Кристалл 5000». На входящих и исходящих струях измеряли содержание горючих газов и расходы воздуха, одновременно фиксировали производительность оборудования или количество отбитой руды. В лавах дополнительные точки располагали до и после комбайна по ходу движения воздуха; схему наблюдений уточняли с учетом проветривания конкретного участка [1].

На Верхнекамском месторождении непрерывные измерения выполнены на 11 комбайновых комплексах в тупиковых выработках длиной 25-170 м и площадью сечения 8,7-15,6 м². Концентрации газов регистрировали приборами Dräger X-am 5600, скорость воздуха – анемометром АПР-2М. Измерения проводили в течение добычной смены в зоне дыхания машиниста, в середине камеры и в ее устье. В призабойной зоне дополнительно измеряли газовую обстановку в зоне выше комбайна в зону с противоположной стороны от кабины машиниста. Хронометраж включал периоды рубки и простоя, перегрузку руды, движение самоходного вагона и изменения режима местного проветривания.

Для рабочих зон Старобинского месторождения зависимости фактической относительной газообильности от глубины в пределах отдельного калийного горизонта не выявлено; при этом отмечена тенденция ее увеличения от четвертого

горизонта к первому [1]. Повышенное значение 0,06 м³/т зафиксировано при посадке кровли и поступлении значительной части воздуха в лаву из закрепного пространства. Максимальные значения для проходческих комплексов оказались ниже значений, принятых в расчетной инструкции, тогда как для очистных комплексов на большинстве обследованных рудников наблюдалось их превышение. Эти результаты указывают на необходимость учитывать условия конкретной рабочей зоны и процессы в прилегающих пространствах.

В тупиковых выработках Верхнекамского месторождения солей в ходе исследования динамики концентраций сероводорода и метановоздушной смеси отмечен циклический характер их изменения во времени: концентрации возрастали во время рубки и снижались после остановки комбайна. Временные зависимости в рассмотренных режимах имели экспоненциальный характер [2]. Повышенные концентрации регистрировали у противоположной стороны относительно кабины машиниста комбайна, а также у кровли призабойной зоны. В одном из экспериментов содержание газа в середине камеры было в 3-5 раз ниже, чем у забоя; авторы связывают это с разбавлением примеси утечками из вентиляционного трубопровода. Поэтому показания в устье и середине выработки не характеризуют полностью газовую обстановку у источника.

При увеличении производительности комбайна Урал-61 с 1 до 3 т/мин концентрация газа в исследованных условиях возрастала в 5-6 раз. Результаты исследований представлены на рисунке 1.

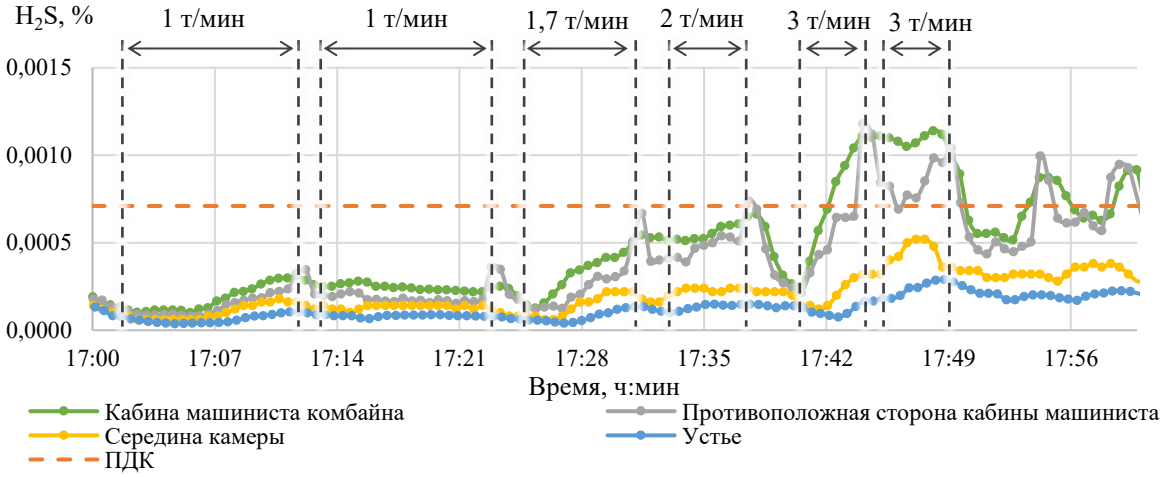


Рис. 1. - Результаты измерений концентрации газа при изменении производительности проходческо-очистного комплекса

На максимальном режиме концентрация сероводорода в отдельных точках у забоя превышала ПДК на 69 %, тогда как в устье превышений не наблюдалось [2]. После прекращения рубки при работающем вентиляторе концентрация снижалась примерно на 70 % от максимума за первые 6-10 мин. Дополнительные колебания были связаны с перегрузкой руды и движением самоходного вагона.

Натурные исследования пылевой обстановки в тупиковой выработке Гремячинского ГОК выполнены при нагнетательном, всасывающем и комбинированном (с преобладанием всасывающего) способах проветривания. В ходе опытно-промышленных испытаний в выработке длиной 140 м и площадью сечения 15,6 м² концентрацию витающей пыли измеряли пылемером ПКА-01 в трех поперечных сечениях: у кабины машиниста комбайна, в зоне перегрузочной стрелы

и на расстоянии 30 м от кабины. Измерения проводили при скоростях воздуха 0,10–0,15 м/с [3]. Результаты показали, что наибольший эффект перехода от нагнетательного к всасывающему проветриванию получен в зоне движения самоходного вагона: средняя по трем точкам концентрация пыли на расстоянии 30 м от кабины машиниста снизилась с 3600 до 280 мг/м³ (примерно в 13 раз); при комбинированном способе она составляла 992 мг/м³. Дополнительно установлено, что за 5 мин после остановки комбайна концентрация пыли возле кабины машиниста снижалась с 1182 до 275 мг/м³ при всасывающем проветривании и с 3342 до 1001 мг/м³ при нагнетательном.

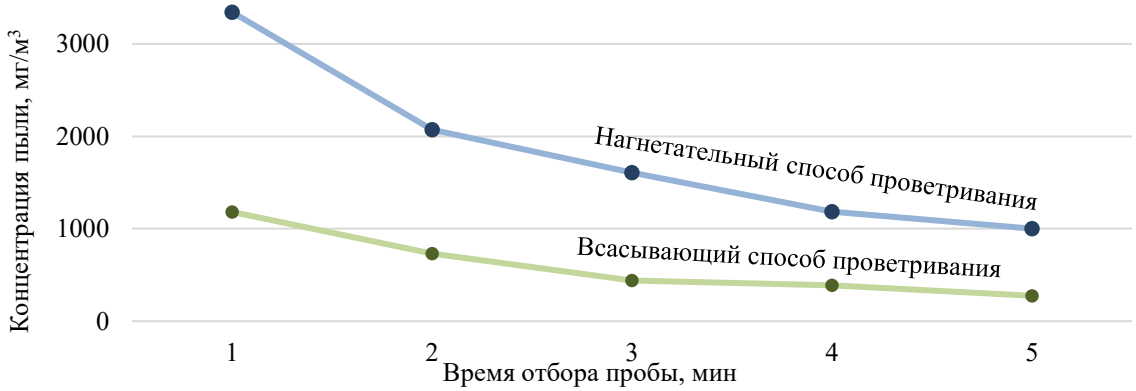


Рис. 2. - Сравнительный график оседания пыли после остановки комбайна

В целом проведенный анализ показал, что натурные наблюдения вредных примесей должны охватывать источник загрязнения, рабочее место и пути переноса примесей. В тупиковых выработках принципиальны пространственная неоднородность и цикличность концентраций; на очистных участках со столбовой системой разработки – поступление газов из прилегающих пространств и изменения обстановки при посадке кровли. Совмещение дискретного отбора проб, непрерывной регистрации и измерений расходов воздуха дает основу для уточнения расчетов параметров проветривания и более обоснованного выбора точек мониторинга вредных примесей. Дополнение этой схемы измерениями запыленности позволяет также обосновать совместный контроль газового и пылевого факторов для рабочих зон различной топологии.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.10.2

Литература

1. Трушкова Н.А. Обоснование способов рециркуляционного проветривания в системах горных выработок подземных рудников: дисс. … канд. техн. наук. – Пермь, 2025. – 158 с.

2. Мальцев С. В., Файнбург Г. З., Семин М. А., Козунин И. И. Исследования нестационарных процессов газовыделения в тупиковых комбайновых выработках калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 6. — С. 5–19. — DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_5.

3. Левин Л. Ю., Суханов А. Е., Исаевич А. Г., Козунин И. И. Экспериментальные исследования зависимости пылевой обстановки в тупиковой выработке от применяемого способа проветривания при механизированной добыче калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 10. – С. 35–50. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_35.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКЕ И СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Семин М.А., Накаряков Е.В., Трушкова Н.А., Зайцев А.В., Левин Л.Ю.

Горный институт УрО РАН

Ключевым аспектом параметризации сетевых моделей газораспределения является корректное задание источников газовыделения в местах ведения горных работ. Этот вопрос актуален как при рассмотрении работы горной техники в подземных рабочих зонах, так и при моделировании буровзрывных работ. Образующиеся в подземных горных выработках газы не сразу покидают тупиковую призабойную зону, а длительное время удерживаются в крупномасштабном стационарном вихре, формируемом воздушной струей, выходящей из вентиляционного трубопровода.

Математическая модель должна корректно воспроизводить динамику снижения концентрации газа в призабойной зоне вследствие разбавления свежим воздухом и постепенного выноса газа в сквозную вентиляционную струю. Несмотря на трехмерный характер этого процесса, модели пониженной размерности позволяют анализировать его достаточно точно и оперативно, без проведения вычислительно затратного трехмерного моделирования. К таким подходам относятся двух- и многозонные модели проветривания призабойного пространства, предложенные в [1] и получившие дальнейшее развитие в [2]. В настоящей работе рассматривается ранее не изученный вопрос параметризации двухзонной модели газораспределения в тупиковой камерообразной выработке при нагнетательном способе проветривания. Расширение разрезной выработки и наличие развала отбитой руды (рис. 1) могут приводить к формированию основной и дополнительной циркуляционных зон. Примесь, накопленная в слабопроточной зоне, постепенно поступает в основной поток и замедляет проветривание рабочей зоны. Поэтому описание проветривания одной экспонентой с поправкой на эффективный объем не всегда воспроизводит динамику концентрации газов.

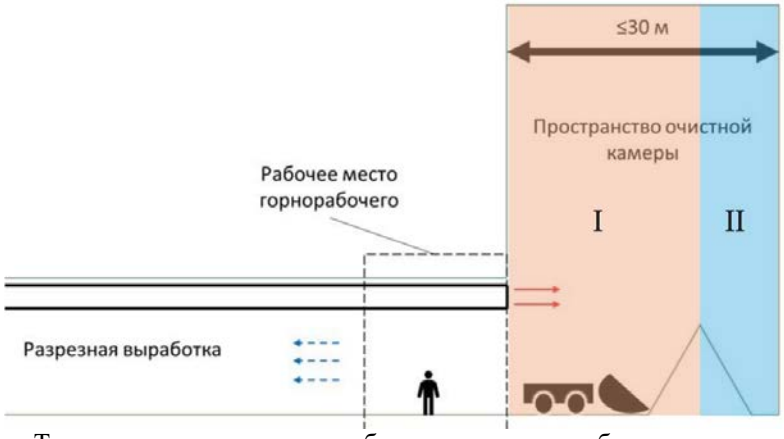


Рис. 1 — Тупиковая очистная камерообразная горная выработка с развалом руды

Призабойное пространство камеры целесообразно разделить на две зоны, условно обозначенные на рис. 1 как I и II, каждая из которых характеризуется

собственной вихревой циркуляцией. Уравнения переноса примеси в такой системе имеют вид:

$$V_I \frac{dC_I}{dt} = -k_I Q_I C_I + k_{II} Q_{II}(C_{II} - C_I) + G_I, \quad (1)$$

$$V_{II} \frac{dC_{II}}{dt} = k_{II} Q_{II}(C_I - C_{II}) + G_{II}, \quad (2)$$

где V_I и V_{II} – объемы зон I и II, C_I и C_{II} – средние концентрации газа в зонах I и II, Q_I – расход воздуха поступающего из вентиляционного трубопровода в зону I, Q_{II} – расход воздуха поступающего из зоны I в зону II (и наоборот), k_I и k_{II} – коэффициенты турбулентной диффузии Воронина, G_I и G_{II} – источниковые слагаемые (для случаев, когда в рабочих зонах есть источники газовыделения).

Тогда параметризация модели (1)–(2) заключается в определении объемов зон, интенсивностей массообмена между ними, выраженных через расходы воздуха, а также коэффициентов Воронина, обеспечивающих согласование расчетных зависимостей с экспериментом. Эти коэффициенты позволяют учесть отклонение реального процесса переноса от закона идеального перемешивания.

В настоящей работе параметризация выполнена на примере тупиковых камерообразных горных выработок, формируемых путем расширения разрезной выработки, что характерно для систем разработки на медно-никелевых рудниках Норильского региона. Сопоставление результатов двухзонной модели с данными многопараметрических численных расчетов динамики газовоздушной смеси в тупиковой камере в Ansys Fluent (рис. 2), позволило получить физически обоснованные значения параметров модели при различных размерах навала руды. Полученные результаты, по сути, являются основой для последующей параметризации модели по данным натурных экспериментов.

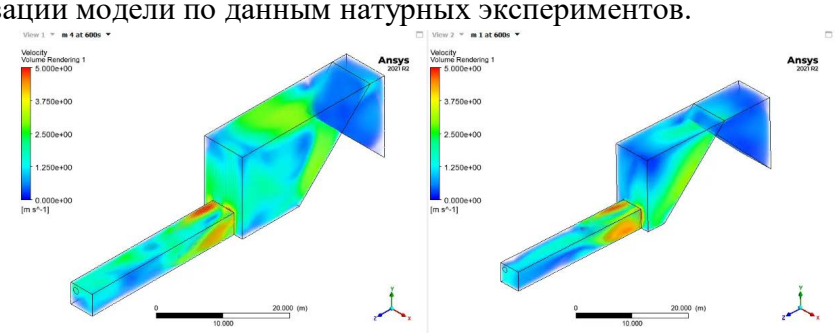


Рис. 2 — Численно рассчитанные распределения скорости в тупиковая очистной камере при различных размерах навала руды

Рассчитанные с помощью двухзонной модели зависимости концентрации газа на выходе из камеры от времени могут использоваться при моделировании газораспределения в сети горных выработок. При этом камера представляется динамическим элементом сетевой модели: сетевой расчет задает расходы и состав поступающего в камеру воздуха, а двухзонная модель определяет поток примеси, поступающий из камеры в вентиляционную сеть в каждый момент времени.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.10.3

Литература

1. Файнбург Г. З. Цифровизация процессов проветривания калийных рудников: монография. — Пермь–Екатеринбург, 2020. — 422 с.

2. Semin M., Faynburg G., Tatsiy A., Levin L. General patterns of pollutant removal after blasting in blind headings // Discover Applied Sciences. — 2026. — Vol. 8. — Article 386.

РАЗРАБОТКА, ПРОГРАММИРОВАНИЕ И ОТЛАДКА АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА БАЗЕ ПОЛУЧЕННОГО РАНЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ ВОЗДУХА

Семин М.А., Колесов Е.В., Бублик С.А.

Горный институт УрО РАН

В работе предлагается алгоритм решения обратной задачи газораспределения (ОЗГ), задачей которого является восстановление интенсивностей источников вредной примеси в руднике по экспериментально определенным концентрациям примесей на замерных станциях и при известном распределении расходов воздуха. Актуальность предложенного алгоритма связана с необходимостью в режиме реального времени знать «картину» газораспределения в рудничных вентиляционных сетях с учетом нестационарности фактических источников газовыделения, определяемой режимами работы горной техники, графиком и параметрами взрывных работ, свойствами породного массива.

Рассматриваются математическая постановка ОЗГ, ее программная реализация и отладка. Исходной основой служат расходы воздуха Q_i, полученные при решении обратной задачи воздухораспределения. При этом воздухораспределение в вентиляционной сети принимается стационарным. Дополнительно задаются геометрия выработок, коэффициенты продольной дисперсии примеси, положения потенциальных источников и датчиков. Рассматривается пассивная примесь, не влияющая на воздушные потоки и не вступающая в химические реакции.

Для каждой ветви № i, ориентированной по направлению воздушного потока, используется одномерное конвективно-диффузионное уравнение вида [1]

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{Q_i}{S_i}\frac{\partial c_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_i \frac{\partial c_i}{\partial x}\right) + \frac{w_i(t)}{S_i \Delta_i}\chi_i(x), \quad (1)$$

где c_i – объёмная концентрация примеси; S_i – площадь поперечного сечения; D_i – коэффициент продольной дисперсии; w_i – объёмная интенсивность газовыделений от источника; Δ_i – его протяжённость; безразмерная величина χ_i равна единице на участке газовыделения и нулю вне его.

Начальное распределение концентрации, а также концентрации на воздухоподающих ветвях сети, имеющих аэродинамическую связь с атмосферой, задаются. В узлах сопряжения принимается идеальное перемешивание: концентрация в исходящих ветвях равна средневзвешенной по расходам концентрации входящих потоков. Диффузионным переносом в непосредственной окрестности узла считается пренебрежимо малым.

В вентиляционной сети установлено M замерных станций, для которых известны временные зависимости измеренных концентраций:

$$c_i = c_i^{(m)}(t), i = 1,..,M. \quad (2)$$

Верхний индекс m далее используется для обозначения измеренных величин.

При фиксированных расходах и коэффициентах переноса прямая задача газораспределения линейна по c_i и w_i. В стационарном случае связь между показаниями M датчиков и интенсивностями K источников может быть охарактеризована с использованием следующего векторно-матричного уравнения:

$$\boldsymbol{C}^{(m)} = \boldsymbol{C}^{(0)} + \boldsymbol{G} \cdot \boldsymbol{W}, \quad \boldsymbol{G} = \{g_{ij}\} = \left\{\frac{\partial c_i}{\partial w_j}\right\}, \tag{3}$$

где $\boldsymbol{C}^m$ и $\boldsymbol{C}^0$ – векторы измеренных и фоновых концентраций, $\boldsymbol{W} = \{w_i\}$ – вектор источников, $\boldsymbol{G}$ – матрица чувствительности. Элемент g_{ij} этой матрицы характеризует изменение концентрации на i-й замерной станции, вызванное единичным изменением интенсивности j-го источника. На практике такие коэффициенты могут быть определены путем серии расчетов прямой задачи с последовательной вариацией интенсивности газовыделения на каждом источнике.

Размерность векторов $\boldsymbol{C}^{(m)}$ и $\boldsymbol{C}^{(0)}$ равна M, размерность вектора $\boldsymbol{W}$ равна K.

В частном случае $M = K$, если матрица влияния невырождена, решение может быть записано с использованием обратной матрицы:

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{G}^{-1} \cdot \left(\boldsymbol{C}^{(m)} - \boldsymbol{C}^{(0)}\right). \tag{4}$$

Данное выражение дает явное решение ОЗГ только для квадратной невырожденной матрицы влияния.

В общем случае число замерных станций M и число источников K могут не совпадать. Возможность однозначного восстановления источников определяется рангом матрицы влияния $\boldsymbol{G}$. Если $M \geq K$ и ее столбцы линейно независимы, то есть $rank(\boldsymbol{G}) = K$, матрица $\boldsymbol{G}$ имеет полный столбцовый ранг, и для неё существует левая обратная матрица $\boldsymbol{G}_L^{-1}$, удовлетворяющая условию

$$\boldsymbol{G}_L^{-1} \cdot \boldsymbol{G} = \boldsymbol{I}_K. \tag{5}$$

Тогда в (4) при определении $\boldsymbol{W}$ должно использоваться именно $\boldsymbol{G}_L^{-1}$. При этом единственное точное решение существует при условии совместности системы (3).

Если $rank(G) < K$, существуют различные комбинации источников, формирующие одинаковые показания датчиков, и задача является неопределенной, а некоторые источники газовыделения окажутся неразличимы. К примеру, для сети на рис. 1 в стационарной постановке два последовательно расположенных источника w_2 и w_3 могут оказаться неразличимыми, если на всех доступных замерных станциях их вклад проявляется только через суммарное газовыделение. Тогда соответствующие столбцы матрицы влияния линейно зависимы, и вместо w_2 и w_3 целесообразно ввести эквивалентный источник $w_2' = w_2 + w_3$.

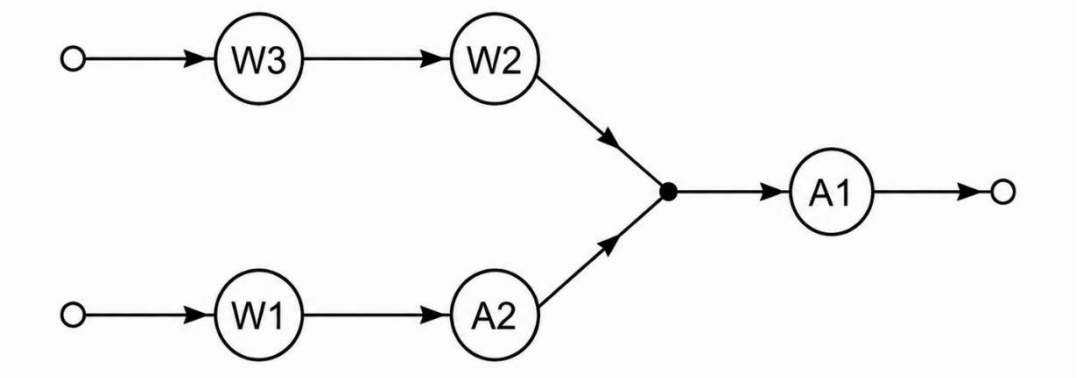


Рис. 1. - Вентиляционная сеть с параллельным соединением ветвей

Разделение суммарной интенсивности между отдельными рабочими зонами в таком случае требует привлечения дополнительной информации: паспортных характеристик машин, режимов их работы либо дополнительных измерений. При этом данный вывод относится именно к стационарной постановке: в нестационарном режиме источники w_2 и w_3 потенциально могут стать различимыми из-за различия времен переноса примеси от каждого источника до датчиков.

В другой ситуации, когда $M < K$ (количество замерных станций меньше количества источников вредностей) матрица $\boldsymbol{G}$ не может иметь полный столбцовый ранг. Если $rank(\boldsymbol{G}) = M$, матрица $\boldsymbol{G}$ имеет полный строчный ранг. Для такой матрицы существует правая обратная матрица $\boldsymbol{G}_R^{-1}$, удовлетворяющая условию

$$\boldsymbol{G} \cdot \boldsymbol{G}_R^{-1} = \boldsymbol{I}_M. \quad (6)$$

При этом решение системы (3) существует, однако в общем случае не является единственным, поскольку число неизвестных интенсивностей источников превышает число независимых измерений. Если $\boldsymbol{W}_0$ является одним из решений, то любое решение вида $\boldsymbol{W} = \boldsymbol{W}_0 + \boldsymbol{Z},\ \boldsymbol{Z} \in \ker(\boldsymbol{G})$ также приводит к тем же значениям концентраций на замерных станциях. Здесь $\ker()$ – это ядро матрицы. Следовательно, при $M < K$ однозначное восстановление всех источников по стационарным данным невозможно без привлечения дополнительной информации о них.

В нестационарной постановке показания датчиков зависят от предыстории газовыделения. При преобладании конвекции и малом «размытии» поля концентрации вредной примеси продольной дисперсией применима модель чистого транспортного запаздывания [2]. Если время переноса τ_{ij} кратно шагу измерений Δt, то

$$c_i^{(m)}[n] - c_i^{(0)}[n] = \sum_{j=1}^{K} g_{ij} w_j[n - d_{ij}],\ \ \tau_{ij} = d_{ij}\Delta t. \quad (7)$$

Здесь n – номер отсчёта, d_{ij} – целочисленная задержка.

Уравнения для разных датчиков содержат значения одного источника в разные моменты времени. Поэтому независимое обращение стационарной системы для каждого отсчёта некорректно. Однако данная проблема может быть решена, если рассматривать объединенную систему уравнений, включающую измеренные концентрации $c_i^{(m)}[n]$ и неизвестные интенсивности $w_j[n - d_{ij}]$ на всем исследуемом временном интервале. При этом значения интенсивностей, относящиеся к моментам времени до начала рассматриваемого интервала, должны быть заданы. В этом случае система уравнений (7), записанная для всех n от 1 до N_t (количество временных слоев на исследуемом временном интервале) будет содержать MN_c уравнений.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024), задача № 3.10.4.

Литература

1. К вопросу о расчете распространения вредных примесей в системах горных выработок / М. А. Семин, А. Г. Исаевич, Н. А. Трушкова [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 2. – С. 82-93.

2. Prasad C. C., Krishnaswamy P. R. Control of pure time delay processes // Chemical Engineering Science. — 1975. — Vol. 30, № 2. — P. 207–215.

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях (отчетная конференция, 3 этап) 12- 13 ноября 2026 г., Пермь

КОНВЕКЦИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В СЛОИСТОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, ИМИТИРУЮЩЕЙ КОМБИНАЦИЮ АНТИКЛИНАЛЬНОЙ И СИНКЛИНАЛЬНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКЛАДОК

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

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

Естественная углеводородная залежь – это литологически ограниченное пространство пористой среды, заполненное нефтью или газом. Такой пласт-коллектор сам может иметь слоистую структуру, но также окружен слоями низкопроницаемых пород. Под воздействием пластических деформаций, в таких системах возникают складчатые геологические структуры. Если изгиб слоев направлен выпуклостью вверх (в центре залегают более старые породы, а на крыльях – более молодые), то складка называется антиклинальной, в противоположном случае направления изгиба и залегания молодых пород в центре – синклинальной [1]. В природе встречаются как отдельные складки, так и их совокупности. Природный геотермальный градиент может вызывать в залежи конвективное течение, перемешивающее компоненты углеводородной смеси [2-4]. При этом сложная слоистая и складчатая структура выступает фактором, влияющим на развитие конвекции в такой системе. Боковые части геологической складки, которые отходят от центра – крылья, можно представить в виде системы наклонных слоев пористой среды.

В наклонном слое пористой среды при любых постоянных, но разных температурах на границах всегда существует стационарное основное течение. Увеличение перепада температур приводит к потере устойчивости этого течения. Как следствие, возникает вторичное течение, накладывающееся на основное. Другим типом граничных условий является условие постоянного вертикального градиента температуры, допускающее состояние механического равновесия. В этом случае показано [5, 6], что при любых углах наклона слоя наиболее опасными являются трехмерные возмущения в виде продольных конвективных валов (валов с осями, направленными вдоль слоя и перпендикулярными оси, относительно которой слой наклонен).

В работах [7, 8] с помощью трёхмерного численного моделирования конвекции в системах насыщенных бинарными смесями трёх пористых слоёв, имитирующих антиклинальную [7] и синклинальную [8] геологические складки под действием геотермального градиента, определены условия возникновения конвекции, а также структура и интенсивность конвективных движений, возникающих после потери устойчивости равновесия в зависимости от соотношения проницаемостей слоёв. Пористости слоёв считались одинаковыми, а проницаемости различались. Найдено, что при проницаемостях слоёв, соответствующих критическим условиям возникновения конвекции, возникает слабое течение, охватывающее всю трёхслойную систему. При более высоких проницаемостях появляется составляющая течения в форме продольных валов,

накладывающаяся на слабое сквозное течение. При достаточно близких проницаемостях внешних и внутреннего слоя основное течение концентрируется около внешних стенок складки. Тип складки не вносит качественных изменений в структуру конвективных потоков. Параметры среды, температурные условия и компоненты смеси были выбраны так, чтобы максимально приблизиться к моделированию углеводородной залежи.

В настоящей работе с учетом эффекта термодиффузиии исследована конвекция бинарной смеси жидких углеводородов тетралина и додекана, взятых в равных долях, в системе трех пористых слоев, имеющих различные проницаемости и складчатую структуру, и находящихся под действием геотермального градиента. Компоненты рассматриваемой смеси являются представителями основных групп соединений, входящих в нефть. Рассматриваемая геометрия представляет собой совокупность антиклинальной и синклинальной складок (Рис.1). Длина расчетной области составляет 250 м, ширина – 100 м, высота каждого слоя – 25 м. Эти размеры характерны для пластов, содержащих углеводороды. При таких геометрических размерах углы складки (углы между наклонными плоскостями) составляет примерно 152 градуса.

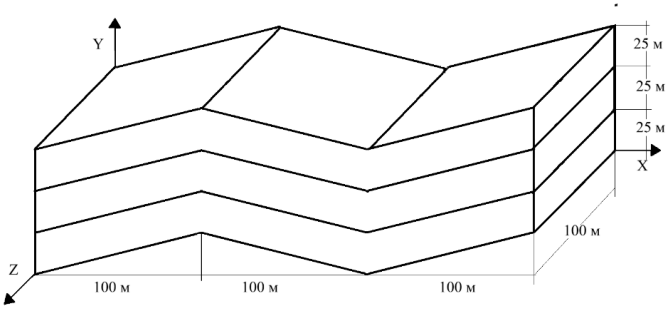
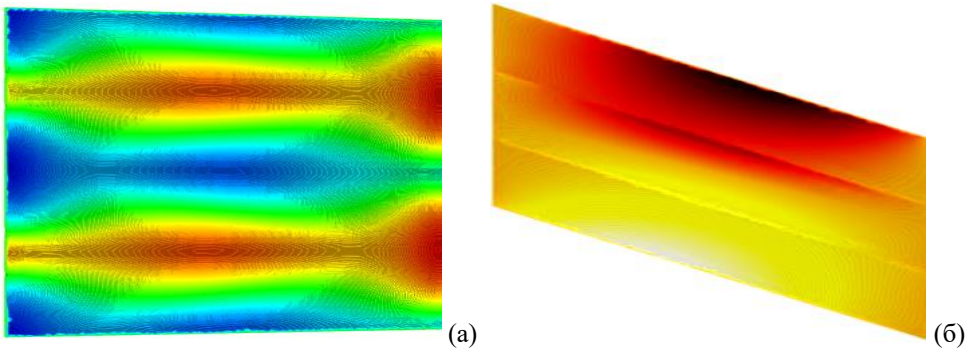


Рис. 1. – Модель геологической складки, имитирующей совокупность антиклинали и синклинали

Моделирование проводится в рамках уравнений Дарси-Буссинеска [9]. Границы расчетной области твердые, непроницаемые для вещества. На верхней и нижней границах задаётся распределение температуры, соответствующее 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. Проницаемости внешних слоёв (K) считаются одинаковыми и всегда меньшими, чем проницаемость внутреннего слоя (K).

Нелинейные трёхмерные расчёты показали, что при проницаемости внутреннего слоя $K_{in} = 2 \cdot 10^{-13}$ м^2 и ниже в полости реализуется крупномасштабное течение, соответствующее длинноволновой моде. Когда проницаемость среднего слоя достигает значения $K_{in} = 10^{-12}$ м^2 и выше, течение приобретает структуру продольных валов (Рис. 2а). Анализ временной эволюции структуры течения для внутреннего слоя показал, что повышение K_{in} приводит к увеличению количества вихрей и ускорению развития потока. Прослежены диапазоны проницаемостей, при которых наблюдается течение в виде продольных валов.

При достаточно близких проницаемостях слоёв основное течение жидкости происходит во внешних слоях, хотя они менее проницаемы, чем внутренний. Это связано с тем, что течение в пределах каждого крыла складки становится крупномасштабным (один конвективный вал занимает все слои крыла) (Рис. 2б).



(а) (б)

Рис. 2. – Изолинии скорости в крыле складки: вертикальная составляющая скорости вдоль среднего слоя при высоких проницаемостях слоев (а); горизонтальная составляющая скорости в плоскости, перпендикулярной боковым границам слоя, при невысоких близких проницаемостях слоев (б)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.11.1.

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. Lyubimova T., Shubenkov I., Ozhgibesova N. Soret-induced convection in a layered porous medium simulating an anticlinal geological fold under the action of a geothermal temperature gradient // Heat Transfer. 2025. Vol. 54. P. 2251–2264. https://doi.org/10.1002/htj.23289
8. Шубенков И.С., Любимова Т.П. Возникновение и нелинейные режимы конвекции бинарных смесей в многослойных системах, имитирующих синклинальные геологические складки. // Вычислительная механика сплошных сред. 2026. Т. 19(1). С. 31-42. https://doi.org/10.7242/1999-6691/2026.19.1.3
9. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. New York: Springer, 2013. 778 p.

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСИЯ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ, ПОДОГРЕВАЕМОМ СНИЗУ

Любимова Т.П., Ковалевская К.В.

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

Работа посвящена исследованию влияния вертикальных вибраций (модуляции силы тяжести) на возникновение свободной тепловой конвекции вязкоупругой жидкости в плоском горизонтальном слое, подогреваемом снизу.

Уравнения свободной тепловой конвекции в модулированном поле тяжести, в приближении Буссинеска записываются в виде:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + g\beta T\left(1 + \frac{b\omega^2}{g} f(\omega t)\right)\vec{e} + \frac{1}{\rho}\mathrm{Div}\,\bar{\bar{\sigma}}, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}\nabla T = \chi \Delta T, \qquad (2)$$

$$\mathrm{div}\,\vec{v} = 0. \qquad (3)$$

Здесь $\vec{v}$ - скорость, T - температура, отсчитываемая от некоторого среднего значения, p - конвективная добавка к гидростатическому давлению, $\bar{\bar{\sigma}}$ тензор избыточных напряжений, ρ - плотность жидкости, β - коэффициент теплового расширения, χ - коэффициент температуропроводности, $\vec{e} = (0,\ 0,\ 1)$ - единичный вектор в вертикальном направлении.

Для описания реологического поведения жидкости использовалась модель Олдройда-В [1]:

$$\bar{\bar{\sigma}} + \lambda \frac{d}{dt}\bar{\bar{\sigma}} = 2\mu_0\left(1 + \lambda_r \frac{d}{dt}\right)\dot{\bar{\bar{\gamma}}}. \qquad (4)$$

Здесь $\dot{\bar{\bar{\gamma}}}$ - тензор скоростей деформации, λ - время релаксации напряжений, λ_r - время запаздывания деформаций, μ_0 - динамическая вязкость.

Рассматриваемая задача имеет решение, соотвествующее состоянию механического равновесия. Для изучения линейной устойчивости этого состояния решалась система линеаризованных уравнений малых возмущений, дополненная граничными условиями для возмущений.

Рассматривался случай свободных недеформируемых границ слоя и ступенчатой модуляции силы тяжести. В этом случае задача допускает аналитическое решение. Сравнительный анализ результатов с численными данными, полученными в [2] в рамках модели Максвелла для случая твердых границ и синусоидальной модуляции сила тяжести, показал качественное различие результатов в области низких частот модуляции. Расчеты, проведенные в работе [2], где границы устойчивости находились численно с применением разложения по чебышевским полиномам для аппроксимации зависимости решения от пространственной координаты, дали для всех чисел Деборы пороговые значения числа Релея, соответствующие так называемому эмпирическому критерию устойчивости [3]:

$Ra_{min}(1+\eta)>Ra_{c,\,min}$, где η – безразмерная амплитуда модуляции, $Ra_{c,\,min}$ – минимальное критическое значение числа Релея в отсутствие модуляции (левая часть неравенства $Ra_{min}(1+\eta)>Ra_{c,\,min}$ показывает наибольшее значение числа Релея, которое может быть достигнуто за период модуляции, таким образом, конвекция начинается задолго до достижения критического значения $Ra_{c,\,min}$ в отсутствие модуляции, т.е. низкочастотная модуляция всегда оказывает дестабилизирующее действие). В частности для чисел Деборы, при которых в отсутствие модуляции силы тяжести наиболее опасными являются монотонные возмущения, при наличии модуляции, в [2] получено одно и то же значение минимального критического числа Релея, в $(1+\eta)$ раз меньшее, чем в отсутствие модуляции. В то же время аналитические расчеты, проведенные в настоящей работе дали для чисел Деборы в этом интервале разные значения минимального критического числа Релея.

По нашему мнению, обсуждаемое качественное различие результатов в области низких частот модуляции связано с особенностями применения метода Флоке. При использовании метода Флоке считается, что малые возмущения вносятся в систему лишь в начальный момент времени. В действительности же это не так – система постоянно испытывает случайные внешние воздействия. В случае низкочастотной модуляции отклик системы наступает достаточно быстро по сравнению с периодом модуляции, и кроме того, модулируемый параметр значительную часть периода принимает достаточно большие значения, так что система находится в надкритической области. В таких условиях нельзя не учитывать наличие флуктуаций (шума).

Как показано в [4] на примере нескольких модельных задач, при низких частотах модуляции параметра даже слабый шум может приводить к качественным изменениям в поведении системы и даже изменить знак эффекта, так что вместо стабилизации, предсказываемой моделью Ляпунова-Флоке будет наблюдаться дестабилизация. Это объясняется тем, что стабилизация, предсказываемая классической теорией, основана на том факте, что, хотя начальное возмущение растет в течение части периода модуляции, оно очень сильно затухает в другой части периода, так что после нескольких периодов модуляции система полностью забывает начальное возмущение, а шум, который фактически всегда присутствует, может спровоцировать генерацию конвективного движения снова. Сделан вывод о том, что при медленном изменении параметра анализ устойчивости должен быть дополнен учетом непрерывно действующих возмущений.

Для проверки этой гипотезы в настоящей работе была проведена серия расчетов, в которых рассматриваемая задача решалась численно методом Рунге-Кутты-Мерсона, в отсутствие шума и при наличии шума, который вносился как случайная функция на каждом шаге по времени. На рисунке 1 приведены зависимости минимального критического числа Релея от числа Деборы, полученные в рамках аналитически и с помощью численного интегрирования, при безразмерной частоте модуляции силы тяжести, равной $\Omega=0.01$, и безразмерной амплитуде модуляции $\eta=1$. Для сравнения, на том же рисунке приведена аналогичная зависимость в отсутствие модуляции. Как видно, для всех значений числа Деборы порог устойчивости равновесия, найденный численно с помощью метода Рунге-Кутты, примерно в два раза ниже, чем в случае статического поля тяжести, что согласуется с эмпирическим критерием устойчивости [3].

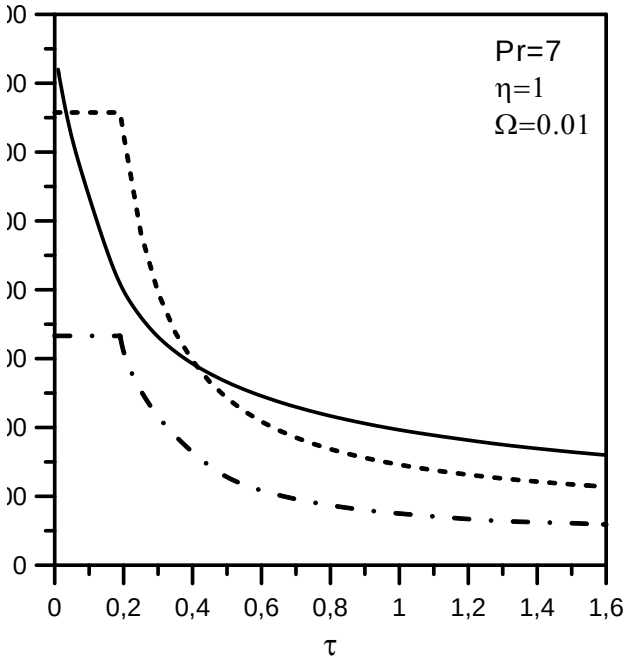


Рисунок 1. Границы устойчивости на плоскости параметров минимальное критическое число Релея – число Деборы. Штриховая линия – в отсутствие модуляции силы тяжести, сплошная и штрихпунктирная линии – при наличии модуляции с параметрами, указанными на рисунке; сплошная линия – аналитическое решение, штрихпунктирная линия – решение, полученное численно методом Рунге-Кутты.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при численном решении задачи методом Рунге-Кутты-Мерсона погрешности метода пошагового интегрирования, играют роль постоянно действующего шума, который отсутствует при аналитическом решении задачи.

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 № 3.11.2.

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.
2. Yang W.M. Stability of viscoelastic fluids in a modulated gravitational field. Int. J. Heat Mass Transfer. 1997. V. 40. №.6. P. 1401-1410.
3. Finucane R.G. and Kelly R.E. Onset of instability in a fluid layer heated sinusoidally from below. Int. J. of Heat and Mass Transfer. 1976. V. 19. P. 71-85.
4. Любимов Д.В., Любимова Т.П., Марышев Б.С. Влияние шума на возникновение конвекции в модулированном поле тяжести. Изв. РАН. Механика жидкости и газа, 2010, № 6, С. 30-37.

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ФРОНТА ВЫТЕСНЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ

Любимова Т.П., Иванцов А.О.

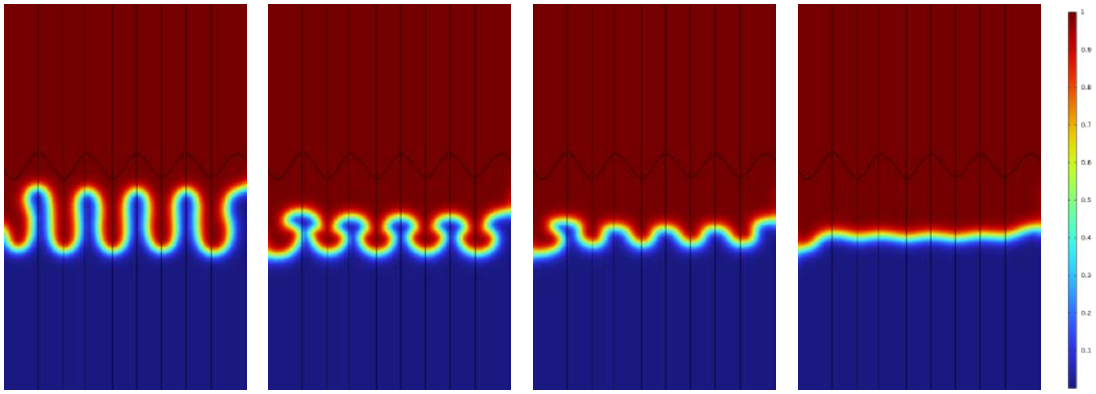
«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

При вытеснении более вязкой жидкости менее вязкой в пористой среде или трещине плоский фронт вытеснения неустойчив: на нём развивается неустойчивость Саффмана–Тейлора [1], приводящая к образованию «вязких пальцев», прорыву вытесняющей жидкости и снижению полноты вытеснения. Это ограничивает эффективность заводнения нефтяных пластов и качество цементирования скважин [2]. Для стабилизации границы раздела предлагались изменение смачиваемости пластин ячейки, добавление наночастиц в вытесняющую жидкость, воздействие электрическим полем [3] и управляемое изменение зазора ячейки [4]. Другим перспективным способом управления является внешнее периодическое воздействие. В работе [5] показано, что вибрации стабилизируют фронт вытеснения в пористой среде по отношению к коротковолновым возмущениям, обладающим наибольшими инкрементами нарастания; в [6] установлена возможность стабилизации вибрациями изолированного жидкого включения. В настоящей работе рассматривается альтернативный механизм, при котором колебания создаются не механическим перемещением системы, а модуляцией приложенного перепада давления. Такое воздействие задаётся режимом закачки и не требует вибрации всей системы.

Рассматривается течение двух несмешивающихся несжимаемых жидкостей в ячейке Хеле-Шоу, которая служит классической моделью как однородной пористой среды, так и отдельной трещины [7]. Перепад давления вдоль ячейки содержит постоянную составляющую, задающую среднюю скорость вытеснения, и осциллирующую, вызывающую периодические пульсации скорости потока. В работе [8] показано, что в системе отсчёта, связанной с движущимся фронтом, уравнения для малых возмущений сводятся к обобщённому уравнению Матьё с двумя осциллирующими членами. Вязкий член обусловлен осциллирующим сопротивлением трения о пластины ячейки и зависит от вязкостей жидкостей; инерционный член связан с неинерциальностью системы отсчёта и совпадает с членом, возникающим в задаче о вибрации. Таким образом, пульсации давления содержат дополнительный, вязкий механизм стабилизации, отсутствующий при механической вибрации. При высоких частотах преобладает инерционный вклад, при низких – вязкий.

В пределе высоких частот методом осреднения получено аналитическое выражение для инкремента нарастания возмущений, а также критическая длина волны и критическая амплитуда осциллирующего градиента давления, при превышении которой подавляются все возмущения короче заданной длины волны. Критические параметры выражены через экспериментально измеряемую амплитуду пульсаций давления. Установлено, что осциллирующий градиент давления всегда по крайней мере столь же стабилизирующий, как вибрация при тех же амплитуде и частоте, а при низких частотах стабилизирует фронт существенно сильнее:

критическая амплитуда пульсаций давления имеет конечный низкочастотный предел, тогда как стабилизирующее действие вибраций при снижении частоты исчезает. Для конечных частот выполнен анализ устойчивости по Флоке, подтвердивший результаты высокочастотного приближения даже при умеренных частотах.



(а) (б) (в) (г)

Рис. 1. - Распределение фаз в момент времени 2 с при частоте пульсаций 900 $с^{-1}$ и амплитуде осциллирующего перепада давления 50 Па (а), 150 Па (б), 175 Па (в) и 200 Па (г); чёрная кривая – начальное положение фронта

Для проверки теории и исследования нелинейной стадии проведено прямое численное моделирование вытеснения нефти водой в ячейке Хеле-Шоу в пакете COMSOL Multiphysics. Течение описывается уравнениями Навье–Стокса с дополнительным членом вязкого трения о пластины, межфазная граница отслеживается методом функции уровня. В отсутствие пульсаций и при малой их амплитуде наблюдается классический сценарий неустойчивости Саффмана–Тейлора: возмущения нарастают, формируя глубокие пальцы воды, проникающие в нефть (рис. 1а). С ростом амплитуды пульсаций пальцы становятся уже и растут медленнее (рис. 1б, в), а при превышении критической амплитуды граница практически не деформируется и сохраняет вид плавной волны, близкой к начальному возмущению (рис. 1г). Построенная по результатам расчётов карта устойчивости хорошо согласуется с теоретической границей.

Реальные флюиды, участвующие в процессах вытеснения, – нефти, полимерные растворы, буровые и цементные суспензии – обладают неньютоновскими свойствами. Поэтому на следующем этапе численно исследовано вытеснение неньютоновской жидкости ньютоновской при пульсациях давления. Реологические свойства вытесняемой жидкости описываются моделью Гершеля–Балкли с регуляризацией Папанастасиу [9], учитывающей предел текучести и убывание эффективной вязкости с ростом скорости сдвига. Установлено, что динамика межфазной границы существенно зависит как от параметров внешнего воздействия, так и от реологических характеристик вытесняемой среды. Численное моделирование показало существование критических значений управляющих параметров, разделяющих режимы развитой неустойчивости, замедленного роста пальцев и полной стабилизации фронта. Реологические свойства вытесняемой жидкости играют определяющую роль в эффективности стабилизации. Построена карта устойчивости в координатах амплитуды и частоты пульсаций давления,

определяющая диапазоны параметров, при которых течение остаётся устойчивым без развития неустойчивости Саффмана–Тейлора.

Полученные результаты имеют существенное значение для решения прикладных задач нефтегазовой отрасли. Установленная возможность подавления неустойчивости Саффмана–Тейлора за счёт пульсаций давления показывает возможность разработки новых методов повышения нефтеотдачи пластов, позволяющих снижать прорывы менее вязкой закачиваемой воды к добывающим скважинам и увеличивать коэффициент охвата пласта. Выявленная зависимость эффективности стабилизации фронта от реологических параметров вытесняемой жидкости создаёт основу для подбора оптимальных режимов закачки с учётом реальных свойств пластовых флюидов. Полученные данные применимы также при проектировании технологий цементирования скважин, где контроль устойчивости фронта вытеснения бурового раствора цементной суспензией критичен для обеспечения герметичности и долговечности крепи.

Таким образом, периодическое воздействие является перспективным инструментом стабилизации фронта вытеснения неньютоновской жидкости в пористой среде, а построенные карты устойчивости позволяют рассчитывать амплитуду и частоту воздействия для заданного уровня стабилизации, что открывает путь к созданию вибрационных методов повышения нефтеотдачи пластов, снижающих прорывы закачиваемой воды к добывающим скважинам.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.11.3.

Литература

1. Saffman P.G., Taylor G.I. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // Proc. R. Soc. Lond. A. 1958. Vol. 245. P. 312-329. https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0085
2. Homsy G.M. Viscous fingering in porous media // Annu. Rev. Fluid Mech. 1987. Vol. 19. P. 271-311. https://doi.org/10.1146/annurev.fl.19.010187.001415
3. Gao T., Mirzadeh M., Bai P., Conforti K.M., Bazant M.Z. Active control of viscous fingering using electric fields // Nat. Commun. 2019. Vol. 10. P. 4002. https://doi.org/10.1038/s41467-019-11939-7
4. Zheng Z., Kim H., Stone H.A. Controlling viscous fingering using time-dependent strategies // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 115. P. 174501. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.174501
5. Любимов Д.В., Седельников Г.А. Влияние вибраций на устойчивость плоского фронта вытеснения в пористой среде // Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 1. С. 6-14.
6. Lyubimova T., Ivantsov A., Lyubimov D. Control of fingering instability by vibrations // Math. Model. Nat. Phenom. 2021. Vol. 16. P. 40. https://doi.org/10.1051/mmnp/2021031
7. Nield D.A., Bejan A. Convection in Porous Media. 5th ed. New York: Springer, 2017. 988 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0
8. Любимова Т.П., Кирпичёв В.А., Устюгов М.Д., Иванцов А.О. Влияние пульсаций давления на устойчивость фронта вытеснения в ячейке Хеле–Шоу // Прикладная математика и механика. 2026. Т. 90, № 3. С. 356-377. https://doi.org/10.7868/S3034575826030023
9. Papanastasiou T.C. Flows of materials with yield // J. Rheol. 1987. Vol. 31, No. 5. P. 385-404. https://doi.org/10.1122/1.549926

Осредненная динамика конвекции Марангони в тонкой пленке на вибрирующей подложке

Алабужев А.А., Володин И.В.

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

Тонкие жидкие пленки образуются в самых разнообразных природных и технологических процессах: от микрофлюидики до геофизических систем. Основные эффекты динамики тонких пленок изложены в обзорах [1,2]. В неизотермическом случае термокапиллярная конвекция Марангони преобладает над термогравитационной и вносит основной вклад в динамику пленки.

В данной работе рассматривается конвекция Марангони в тонкой пленке жидкости на вибрирующей горизонтальной подложке в поле тяжести (рис. 1). Свободная поверхность пленки деформируемая и окружена невесомым газом. Подложка совершает вертикальные вибрации.

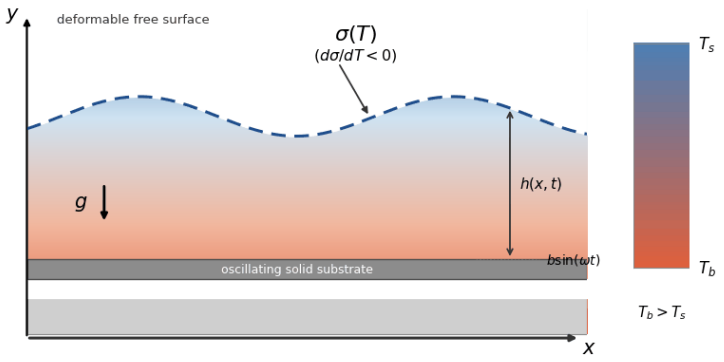


Рис. 1. – Геометрия задачи

Задача решается в длинноволновом приближении с разделением решения на осредненную и пульсационную компоненты, используя метод многих масштабов. Динамика «быстрого» (пульсационного) решения определяется периодом вибраций, «медленная» (осредненная) часть решения определяются нелинейным взаимодействием пульсаций и содержит термокапиллярный вклад.

Исследована устойчивость основного состояния системы относительно малых возмущений. Показано, что сила тяжести и вибрации повышают устойчивость поверхности раздела, тогда как увеличения интенсивности термокапиллярного эффекта приводит к дестабилизации. Показано также, что даже в условиях невесомости стабилизация может быть достигнута за счет вибрационного воздействия. Проведен слабонелинейный анализ и уточнен порог устойчивости.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.11.3.

Литература

1. Oron A., Davis S. H., Bankoff S. G. Long-scale evolution of thin liquid films // Rev. Mod. Phys. 1997. Vol. 69. P. 931. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.69.931
2. Craster R. V., Matar O. K. Dynamics and stability of thin liquid films // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81. P. 1131-1198. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1131

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ВОЗДУШНОГО ПУЗЫРЬКА, ВСПЛЫВАЮЩЕГО В РАСТВОРАХ ВЫБРАННЫХ ПАВ

Кучинский М.О., Любимова Т.П., Галишевский В.А.

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

Процессы взаимодействия газовых пузырьков с потоком жидкости играют ключевую роль в природе и в различных технологических приложениях — от флотации полезных ископаемых и нефтедобычи до химической технологии [1, 2]. Во многих из этих процессов в жидкости помимо пузырьков присутствуют поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые адсорбируются на межфазной границе газ–жидкость и существенно изменяют динамику всплытия пузырьков [3, 4].

Как отмечено в обзорной работе [5], даже незначительные концентрации ПАВ способны кардинально изменить поведение одиночного пузырька: адсорбционный слой перераспределяется вдоль поверхности, возникает градиент поверхностного натяжения, который порождает касательные напряжения, тормозящие движение границы раздела, а также изменяет форму пузырька и структуру течения в окружающей жидкости. Именно поэтому поведение пузырьков в присутствии ПАВ до сих пор остаётся предметом активных исследований: наличие адсорбционного слоя приводит к иной динамике по сравнению с чистой жидкостью, и многие аспекты этого влияния, включая деформацию и колебания формы, изучены недостаточно.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование колебаний воздушного пузырька, всплывающего в воде и в растворах поверхностно-активных веществ.

Описание экспериментальной установки и методики

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Кювета была изготовлена из оргстекла толщиной 3 мм, она имела форму прямоугольного параллелепипеда; её внутренние размеры составляли 109 × 109 мм при высоте 160 мм. В нижней части кюветы устанавливался источник ультразвука с частотой 28 кГц. Кювета заполнялась дистиллированной водой или раствором ПАВ — додецилсульфата натрия (SDS) с концентрацией в диапазоне от 1 до 3 ммоль/л, не превышающем критическую концентрацию мицеллообразования (ККМ) [4].

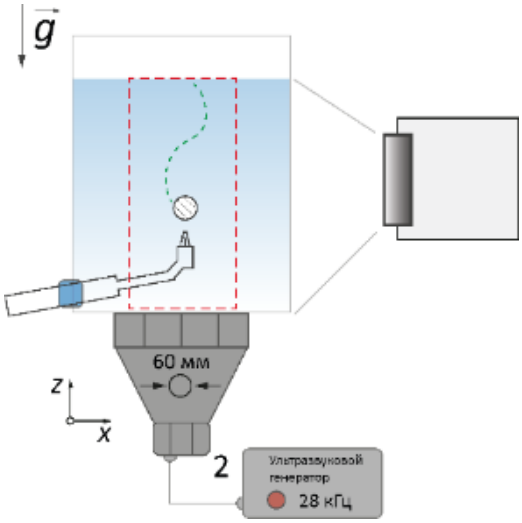


Рис. 1. – Схема экспериментальной установки

Для наблюдения за пузырьком использовались две камеры Basler. Первая камера (Basler acA1920-155um) с телецентрическим объективом позволяла более точно разрешать размеры пузырька, вторая камера (Basler A504kc) использовалась для наблюдения за поведением пузырька при всплытии, в том числе в присутствии ультразвукового воздействия.

Размеры пузырьков регулировались с помощью набора специализированных игл с калиброванным внутренним диаметром (до 32G), что позволяло создавать единичные пузырьки диаметром от 0,5 до 4 мм.

Для обработки изображений был написан код на Python, позволяющий определять скорость всплытия и частоту колебаний формы пузырька, а также отслеживать изменение его формы во времени.

Полученные результаты

Эксперименты показали, что скорость всплытия пузырька существенно зависит от его размера, при этом влияние ПАВ на скорость всплытия пузырька в выбранном диапазоне концентраций ПАВ выявить не удалось. Влияние ПАВ на частоту колебаний формы в исследованном диапазоне концентраций также не было зафиксировано.

Опыты, проведенные в присутствии ультразвукового поля с частотой 28 кГц, показали, что наличие ультразвукового воздействия существенно меняет как картину всплытия пузырька, так и характеристики его колебаний.

В дальнейшем планируется расширить исследования: рассмотреть другие типы ПАВ, а также расширить диапазон размеров пузырьков, что позволит более полно оценить влияние адсорбционного слоя на собственные колебания формы.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.11.4.

Литература

1. Бошенятов Б.В. Гидродинамика микропузырьковых газожидкостных сред // Известия ТПУ. 2005. Т. 308. № 6. С. 156–160.
2. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, Drops, and Particles. New York: Academic Press, 1978. 380 p.
3. Борзенко Е.И., Усанина А.С., Шрагер Г.Р. Влияние поверхностно-активного вещества на скорость всплытия пузырька в вязкой жидкости // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 84. С. 81–92.
4. Борзенко Е.И., Усанина А.С., Шрагер Г.Р. Структура потока при всплытии одиночного пузырька в жидкости с растворенным поверхностно-активным веществом // Теоретические основы химической технологии. 2025. Т. 59, № 2. С. 79–89.
5. Takagi S., Matsumoto Y. Surfactant effects on bubble motion and bubbly flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 2011. Vol. 43. P. 615–636. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122109-160736.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С ЗАБОРОМ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ВОДЫ ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНАХ АКТИВНОГО ТЕХНОГЕНЕЗА

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

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

В ряде ситуаций, имеющих важное практическое значение и существенно влияющих на оценку устойчивости функционирования систем водоснабжения крупных промышленных центров, действующая система правил отведения сточных вод в водотоки соблюдается не полностью. В работах [1,2] рассматриваются особенности влияния техногенных нагрузок на устойчивость функционирования Камского водохранилища, как важнейшего источника технического водоснабжения промышленных предприятий города Березники. Обнаружено формирование устойчивой вертикальной плотностной стратификации, оказывающей существенное влияние на характер забора воды требуемого качества. В связи с этим, для обеспечения устойчивого водоснабжения промышленного предприятия водами данного водохранилища, необходима разработка технологии селективного забора воды.

Мероприятия, направленные на улучшение гидрохимического режима водохранилища, могут быть условно разделены по принципу воздействия и локализации на две основные группы:

1. Активные (оперативные) мероприятия. Направлены на прямое воздействие на водную массу в самом водохранилище с целью разового или периодического снижения концентрации растворенных веществ. Их сущность заключается в искусственной интенсификации водообмена и удалении наиболее минерализованных слоев воды.
2. Пассивные (предупредительные) мероприятия. Направлены на минимизацию притока солей в водоем с площади водосбора. Включают в себя выявление и ликвидацию (или изоляцию) точечных и рассредоточенных источников загрязнения, организацию водоохранных зон, лесомелиорацию и т.д.

Для Верхне-Зырянского водохранилища пассивные мероприятия сопряжены с фундаментальными трудностями. Поступление высокоминерализованных рассолов происходит не из локализованного точечного источника, а в виде рассредоточенных выходов подземных вод или диффузного стока с засоленных территорий. Это делает процессы идентификации и, в особенности, технологического подавления таких источников крайне сложными и длительными. Вероятно, совокупные затраты на полномасштабное гидрогеологическое изучение, разработку и внедрение технологий перехвата рассолов на водосборе по своей продолжительности и финансовой емкости могут значительно превысить стоимость и сроки реализации активных гидротехнических мер непосредственно на акватории.

Таким образом, фокус практического внедрения смещается в сторону активных инженерных решений, реализуемых через модификацию режимов работы гидротехнического узла. Базовым активным мероприятием является промывка водохранилища в период прохождения максимального естественного стока – весеннего паводка. Традиционная методика предполагает предпаводковую сработку полезного объема водохранилища до минимально допустимой отметки (так называемого "мертвого" объема) с последующим пропуском паводковых вод через водосливные сооружения. Теоретически, данный объем воды должен осуществлять разбавление и частичный вынос накопленных солей в нижний бьеф. Однако эффективность данной методики для Верхне-

Зырянского водохранилища существенно ограничена в силу особенностей его гидрологической и гидрохимической стратификации. В условиях устойчивой плотностной стратификации наиболее минерализованные воды аккумулируются в придонном горизонте. Классический поверхностный водозабор, осуществляющий отбор воды из верхних или средних слоев, в период промывки выводит преимущественно свежую, слабоминерализованную паводковую воду. Придонные рассолы при этом остаются в изолированном состоянии и продолжают накапливаться. Таким образом, традиционная промывка без селекции по глубине приводит к нерациональному использованию паводкового ресурса и не решает проблему кардинально, обеспечивая лишь временную и незначительную стабилизацию общего солесодержания.

Качественным технологическим прорывом, позволяющим преодолеть описанные ограничения, является концепция организации селективного водосброса, обеспечивающего принудительный забор воды из придонной области водохранилища. Наиболее эффективной инженерной реализацией данной концепции является создание специализированного сифонного водосброса.

Принцип действия такой системы основан на использовании энергии сифонного эффекта. При проектировании водозаборная часть (входное оголовье) размещается в придонной зоне, в области максимальной концентрации солей. С начала паводкового периода данная система обеспечивает эффективный забор высокоминерализованной воды с последующим ее сбросом в нижний бьеф. Это позволяет целенаправленно и с высокой эффективностью выводить "рассольную подушку", что приводит к значительному снижению общей минерализации водохранилища, к повышению надежности функционирования водозаборов.

Важным инженерным аспектом является то, что организация сифонного водосброса, интегрированного в тело плотины или береговой устой, требует полной реконструкции существующего водослива или строительства отдельного гидротехнического сооружения. Это сопряжено с существенными капитальными вложениями, необходимостью временного изменения режима эксплуатации водохранилища и проведением комплексных изысканий. Техническая возможность организации селективного сброса минерализованных вод является необходимым, но отнюдь не достаточным условием для реализации проекта. Ключевым сдерживающим фактором выступает институционально-правовое поле, регулирующее антропогенное воздействие на водные объекты. Организация целенаправленного сброса вод с высокой минерализацией в нижний бьеф гидроузла представляет собой форму направленного загрязнения водного объекта, которое, согласно действующему водному и экологическому законодательству, требует получения разрешительной документации. Однако в отношении такой специфической операции, как плановая промывка водохранилища с целью улучшения его собственного качества, в нормативных актах существует существенный правовой вакуум.

Для рассмотрения влияния способа пропуска воды через плотину на положение слоя скачка минерализации по глубине проводилось трехмерное численное моделирование. Рассматривалась модельная задача для реальной геометрии исследуемого размером 3100 м вдоль русла, максимальная глубина составляла 11 м. Для построения расчетной сетки область моделирования по акватории разбивалась на четырехугольные ячейки с линейным размером 20 м. По глубине расчетная сетка строилась со сгущением ко дну водохранилища, максимальный размер составлял 0,3 метра, минимальный 0.02 м, при этом число узлов 80 по вертикали. Общее число узлов расчетной сетки 670000 узлов.

Рассматривались два сценария пропуска воды: поверхностный и придонный. В поверхностном пропуске водопропускное устройство опускается так, что вода истекает от участка, расположенного на 1 метр от свободной поверхности. При глубинном пропуске

вода вытекает снизу на расстоянии 1 м от дна. Расход сброса воды соответствует среднемесячному расходу за май месяц, когда проходит весенний паводок - 8,51 м^3/сек.

Численные эксперименты показали, что при пропуске весеннего паводка в случае приповерхностного сценария происходит определенная промывка водохранилища, однако расположение слоя плотностного скачка снижается не значительно. В случае донного водовыпуска для ГТС Верхне - Зырянского водохранилища на протяжении пяти суток происходит практически полная промывка водохранилища, что можно видеть на Рис.1. Снижение концентрации примеси на дне в два раза наблюдается в первые сутки. За пять суток минерализация снижается на порядок и распределение примеси становится практически однородным.

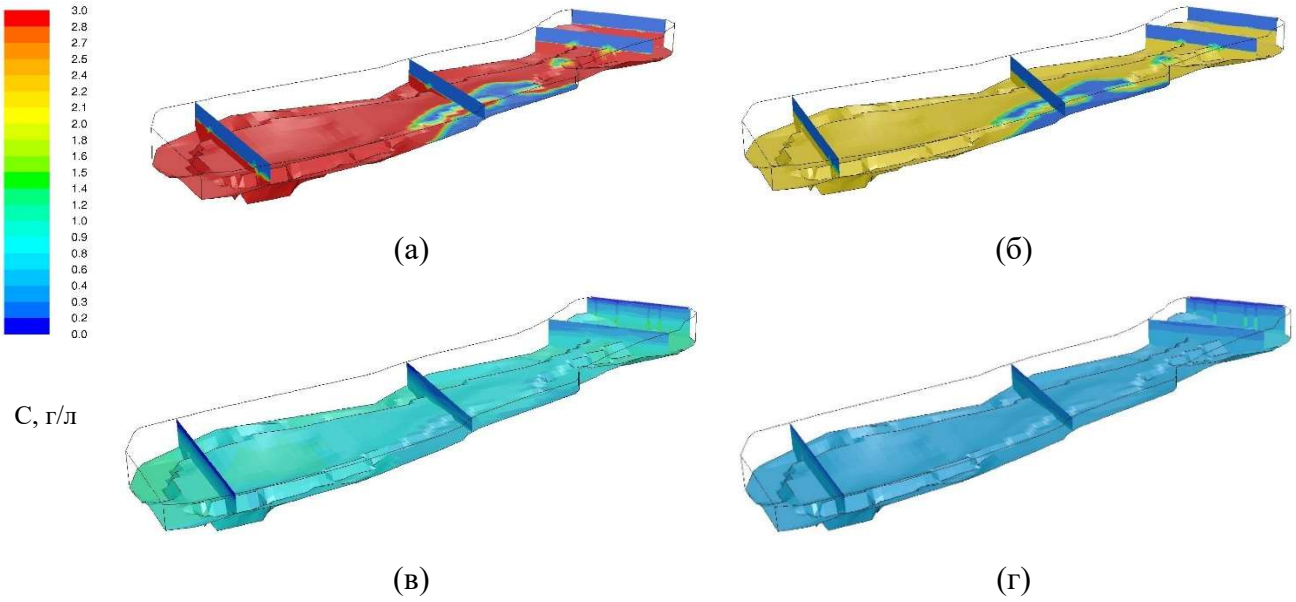


Рис. 1. - Распределения минерализации в створах Верхне - Зырянского водохранилища на дне и в вертикальных сечениях в случае заглубленного сброса воды из водохранилища после, расчетное время (а) - 5 минут, (б) – 12 часов, (в) – двое суток, (г) – пять суток

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.11.5.

Литература

1. 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.
2. Lepikhin A.P., Lyubimova T.P., Bogomolov A.V., Lyakhin Y.S., Parshakova Y.N. Density Effects of Different Genesis in Lowland Reservoirs // Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics, 2024. № 4 (60). P. 463–472.
3. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Bogomolov A., Lyakhin Y., Tiunov A. Peculiarities of hydrodynamics of small surface water bodies in zones of active technogenesis (On the example of the Verkhne-Zyryansk reservoir, Russia) // Water (Switzerland), 2021. № 12 (13). Art. 1638.

КОНВЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ЗАКУПОРКИ В ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ КОЗЕНИ-КАРМАНА

Марышев Б.С., Клименко Л.С.

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

Изучается конвективная устойчивость горизонтального просачивания смеси через слой пористой среды при наличии иммобилизации и закупорки. Фильтрационный поток смеси, состоящей из несущей жидкости и примеси, создается постоянным градиентом давления. Предполагается, что некоторая часть примеси может оседать на стенках пор. Моделирование транспорта примеси проведено в рамках MIM (mobile/immobile media) подхода. [1]. Процесс иммобилизации описывается с помощью нелинейной модели с насыщением немобильной компоненты [2]. Фильтрационное течение описано в рамках приближения Дарси-Буссинеска [3]. При иммобилизации примесь занимает часть порового пространства, т.е. снижается пористость среды и ее проницаемость. Как было показано в работе [4], для многих материалов в качестве зависимости проницаемости среды от пористости можно использовать обобщенное соотношение Козени-Кармана. Основной задачей исследования является изучение условий возникновения конвекции в зависимости от параметров обобщенного соотношения. Обобщенное соотношение Козени-Кармана может быть записано в следующем виде:

$$\kappa = \gamma \frac{\phi^{3+\sigma}}{(1-\phi)^{2\eta}} \qquad (1)$$

Здесь κ – проницаемость среды, ϕ – пористость среды, γ – коэффициент Козени, σ – параметр объема зерна, η – параметр формы зерна. В случае $\sigma = 0$ и $\eta = 1$ имеем классический закон Козени-Кармана [5].

Аналитически получено основное решение задачи, описывающее режим горизонтальной фильтрации. Это решение соответствует присутствию только продольной компоненты скорости, а все величины (концентрация, проницаемость скорость) зависят только от координаты поперек слоя. Зависимости приведенной концентрации мобильной компоненты и проницаемости от вертикальной координаты приведены на Рис. 1. Видно, что увеличением степени закупорки среды концентрация сильнее отклоняется от линейного закона, характерного для среды без учета закупорки. Различные соотношение параметров модели (1) приводят к существенным вариациям проницаемости так наиболее проницаемая модель (Sandstone) демонстрирует наименьшую вариацию.

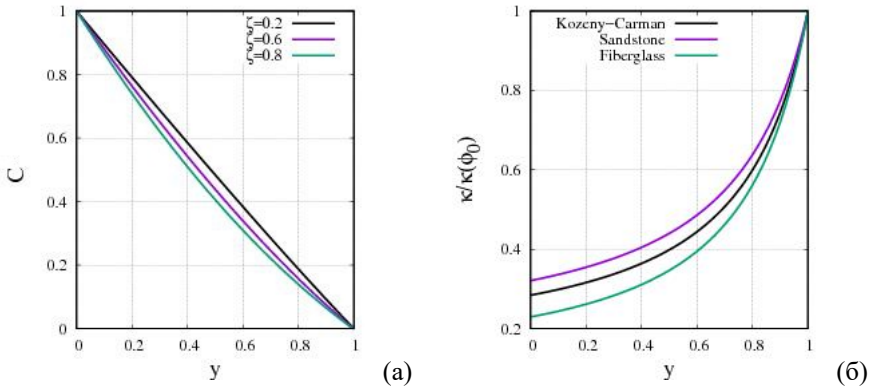


Рис. 1. – Зависимости приведенной концентрации мобильной компоненты (C – приведена к перепаду концентраций между границами слоя, рис. (а)) и приведенной проницаемости (κ приведена к $\kappa(\phi_0)$ - проницаемости чистой среды, рис. (б)) от координаты поперек слоя (y). Кривые на рис. (а) соответствуют различным значениям параметра закупорки, который характеризует максимально возможную степень закупорки среды ($0<\zeta<1$), кривые рис. (б) соответствуют различным моделям закупорки так: $\sigma=0,\eta=1,\kappa(\phi_0)=0.178\gamma$ – стандартный Козени-Карман, $\sigma=0.425,\eta=0.226,\kappa(\phi_0)=0.055\gamma$ – песчаник (Sanstone [4]), $\sigma=1.74,\eta=0.003,\kappa(\phi_0)=0.013\gamma$ – стекловолокно (Fiberglass [4]).

Получены условия возникновения двумерного конвективного течения в виде зависимостей критического числа Релея-Дарси от параметров модели. Показано, что по сравнению с классическим соотношением может наблюдаться как стабилизация горизонтальной фильтрации, так и дестабилизация по сравнению с классическим случаем. Зависимости критических параметров от степени закупорки представлены на Рис. 2

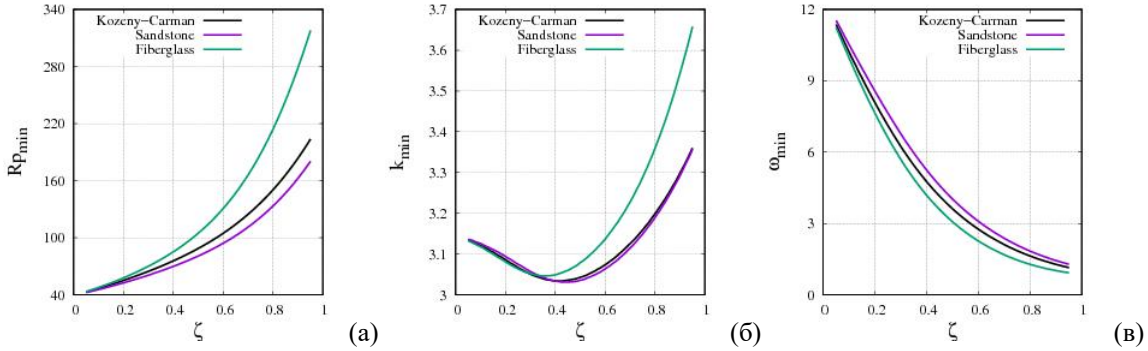


Рис. 2. – Зависимости критического значения числа Релея-Дарси ($Rp_{\min}$ – характеризует силы плавучести, рис. (а)), критического волнового числа ($k_{\min}$, рис. (б)) и частоты критических возмущений ($\omega_{\min}$, рис. (в)) от параметра закупорки (ζ). Кривые соответствуют различным моделям закупорки так: $\sigma=0,\eta=1,\kappa(\phi_0)=0.178\gamma$ – стандартный Козени-Карман, $\sigma=0.425,\eta=0.226,\kappa(\phi_0)=0.055\gamma$ – песчаник (Sanstone [4]), $\sigma=1.74,\eta=0.003,\kappa(\phi_0)=0.013\gamma$ – стекловолокно (Fiberglass [4]).

Из Рис. 2 видно, что с ростом параметра закупорки происходит резкая стабилизация основного течения, развитие конвекции затруднено. Это приводит к сжатию конвективных ячеек (волновое число растет) и замедлению колебаний.

Наиболее ярко эти тенденции проявляются для модели наименее проницаемого материала – стекловолокна. На Рис. 3 показаны зависимости критических параметров от параметра объема зерна σ.

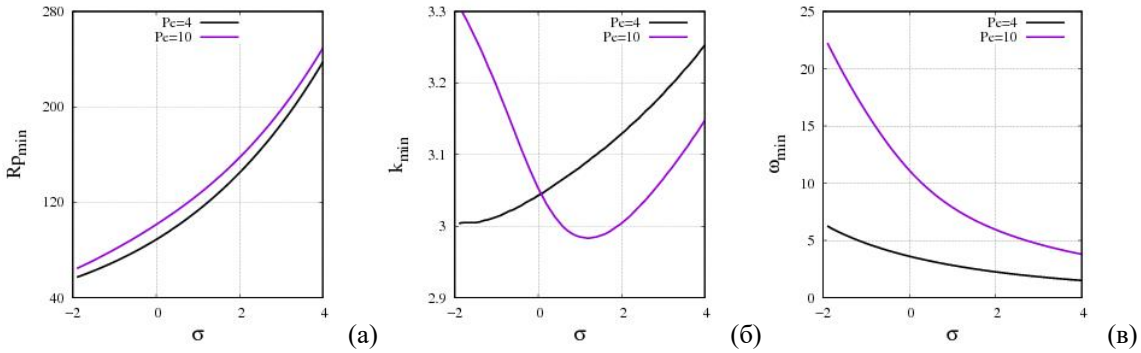


Рис. 3. – Зависимости критического значения числа Релея-Дарси ($Rp_{\min}$ – характеризует силы плавучести, рис. (а)), критического волнового числа ($k_{\min}$, рис. (б)) и частоты критических возмущений ($\omega_{\min}$, рис. (в)) от параметра объема зерна (σ). Кривые соответствуют различным интенсивностям фильтрационного потока (Pe – число Пекле, отношение скорости фильрации вдоль слоя в чистой среде к диффузионной скорости).

Из Рис. 3 видно, что с ростом параметра объема происходит стабилизация течения, зерна занимают все большую долю объема среды. Так же видно, что с ростом интенсивности фильтрационного потока он становится стабильнее а колебательная динамика ускоряется.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.11.6.

Литература

1. Deans H. A. A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media // SPE Journal. 1963. Vol. 3. P. 49-52.
2. Selim H. M. Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multireaction models // Environ. Health Perspect. – 1989. Vol. 83. P. 69-75
3. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. Springer. New York, 2017, 988 p.
4. Henderson N., Brêttas J. C., Sacco W. F. A three-parameter Kozeny–Carman generalized equation for fractal porous media // Chem. Eng. Sci. – 2010. Vol. 65. P. 4432-4442
5. Carman, P.C., Fluid Flow through a Granular Bed // Trans. Inst. Chem. Eng. London. 1937 Vol. 15, P. 150–156.

КАПЛЯ С ПУЗЫРЬКОМ ГАЗА В НЕОДНОРОДНОМ РАСТВОРЕ ПАВ

Денисова М.О., Костарев К.Г.

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

Жидкостная экстракция является одним из наиболее эффективных способов разделения жидких систем на отдельные компоненты. Основой метода является диспергирование выбранной жидкой смеси в другой жидкости, которая не смешивается с основой смеси, но извлекает из нее интересующий нас компонент путем его растворения. Метод прост, технологичен, но не лишен ряда серьезных недостатков, главным из которых является малое время пребывания капель в объеме экстрагента из-за разности плотностей исходных жидкостей. Для снижения этого перепада плотностей между каплей и окружающей средой предлагается использовать введение в каплю пузырька газа на стадии ее формирования.

Наибольший интерес представляет вариант, когда экстрагируемый компонент представляет собой ПАВ, поскольку процесс его экстракции сопровождается развитием конвекции Марангони, которая существенно ускоряет массообмен как в капле, так и в окружающей среде. Отметим, что в данном случае извлекаемый ПАВ изначально растворен в смеси, окружающей каплю (такая конфигурация характерна для экстракции ряда жидкостей).

Исследуемая капля помещена в вертикальную ячейку Хеле-Шоу, благодаря чему приобретает форму короткого горизонтального цилиндра. Массообмен такой капли с окружающей средой идет через ее свободную боковую поверхность, а ее плоские торцы, примыкающие к стеклам ячейки, позволяют применить для визуализации течений и полей концентрации интерферометр Физо. В качестве жидкости капли выбрана смесь бензола и хлорбензола. Окружающая среда – стратифицированный по концентрации водный раствор этилового спирта. Опыты прошлого года показали, что в этом случае положение пузырька газа в капле совпадает с областью развития интенсивной конвекции Марангони. Последнее обстоятельство приводит к заметному увеличению размеров возникающих конвективных ячеек по сравнению со случаем капли без пузырька при прочих равных условиях. В обоих случаях наблюдается установление колебательного режима концентрационной конвекции. Исследования этого года проекта должны были ответить на следующие вопросы: (а) в чем заключается специфика развития конвекции Марангони в капле с пузырьком и каким образом появление пузырька оказывает влияние на интенсивность перемешивания окружающего раствора; (б) каково влияние размера газового пузырька на изменение интенсивности конвективного движения; (в) выбор характеристик для описания изменения концентрационного поля в зависимости от наличия пузырька в капле.

Для выяснения специфики конвективного движения разобьем период колебаний интенсивности течения вокруг капли на две составляющих – капиллярную, обусловленную развитием конвекции Марангони, и гравитационную, связанную с восстановлением стратификации ПАВ вокруг капли за счет архимедовых сил. Для капель без пузырьков в стратифицированных растворах

характерно преобладание гравитационной составляющей. В подтверждение этого высказывания приведем зависимость составляющих периода от порядкового номера периода для капли без пузырька в стратифицированном растворе этилового спирта (рис. 1). Действительно, для большинства периодов капиллярная составляющая в 4-5 раз меньше гравитационной.

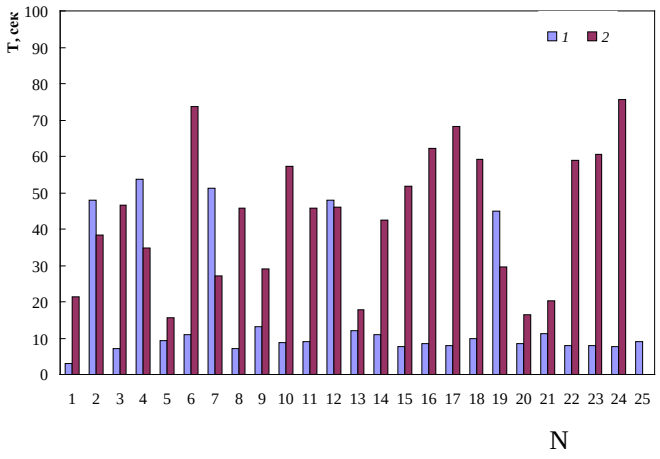


Рис. 1. Зависимости капиллярной (1) и гравитационной (2) составляющих периода осцилляций от порядкового номера периода для капли без пузырька в растворе этилового спирта с исходной концентрацией C_{01} = 4.2 моль/л

Совсем по-другому выглядит соотношение составляющих периода колебаний для капли с пузырьком в растворе с той же концентрацией (рис. 2). Появление пузырька в капле приводит к трех-четырехкратному преобладанию капиллярной составляющей над гравитационной на начальном этапе осцилляций. Таким образом, пузырек практически на порядок удлиняет по времени процесс интенсивного перемешивания.

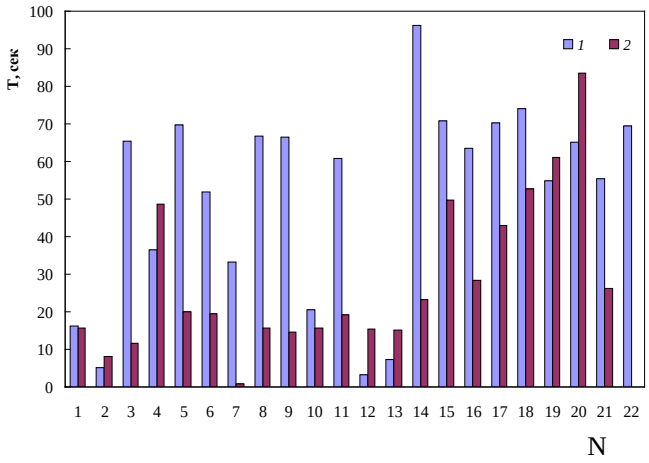
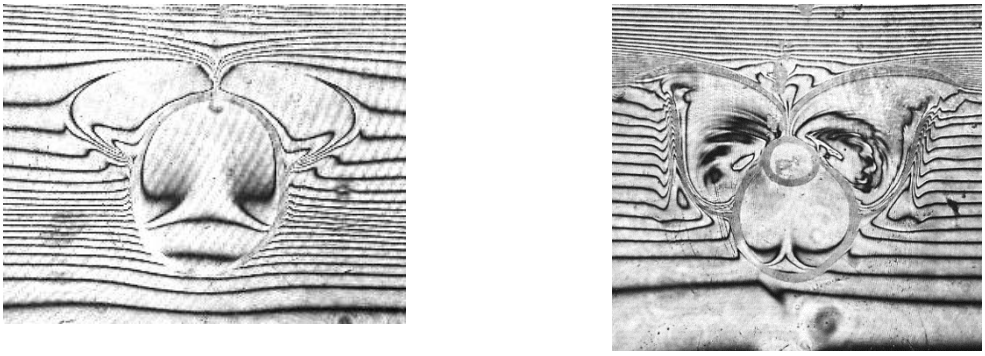


Рис. 2. Зависимости капиллярной (1) и гравитационной (2) составляющих периода осцилляций от порядкового номера периода для капли с пузырьком в растворе этилового спирта с исходной концентрацией C_{01} = 4.2 моль/л.

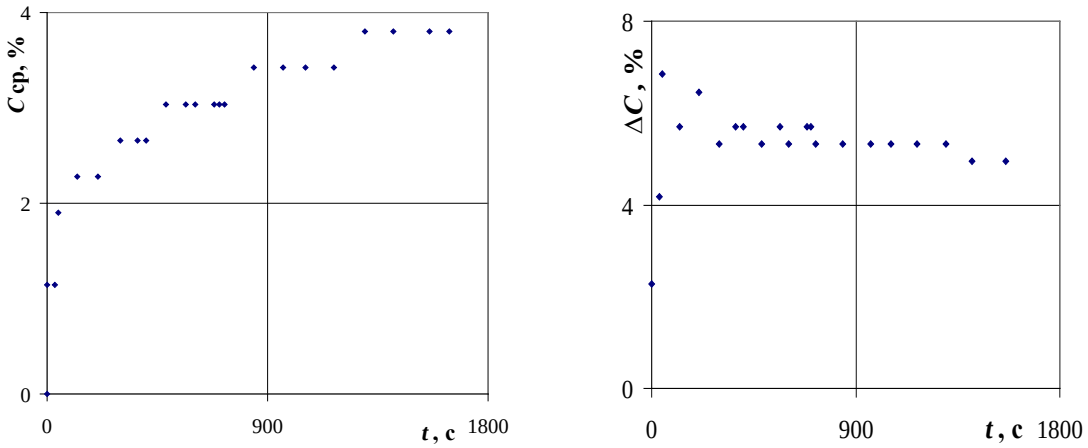
Что касается зависимости интенсивности конвекции от размера пузырька, то из сравнения интерферограмм на рис.3 хорошо видно, что с размером пузырька растет и размер конвективных ячеек, а, следовательно, и интенсивность конвекции.



а *б*

Рис. 3. Интерферограммы полей концентрации этилового спирта на момент «вспышки» конвекции Марангони для случая капель с D_0 = мм и пузырька с d_0 = мм (а) и с D_0 = мм и пузырька с d_0 = мм (б). Время с начала опыта t = с

На рис. 4 приведены зависимости двух наиболее интересных характеристик эволюции колебательного режима – средней концентрации раствора на уровне центра капли и возникающего перепада концентрации на момент «вспышки» конвекции Марангони. Видно, как рост средней концентрации раствора вблизи капли уменьшает межфазное натяжение, которое, в свою очередь, снижает концентрацию неконтролируемых примесей на поверхности капли и тем самым пороговый перепад концентрации ПАВ для начала конвективного движения Марангони.



а *б*

Рис. 4. Зависимости от времени средней концентрации в объеме окружающего раствора ПАВ на уровне экватора капли (а) и перепада концентрации ПАВ между полюсами капли на момент «вспышки» конвекции Марангони (б).

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.11.7.

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКЦИИ ПАВ НА ДИНАМИКУ ГРАВИТАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ КАПЛИ

Краснякова Е.А., Шмыров А.В., Мизев А.И.

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

Движение капель в жидкой среде, сопровождающееся межфазным массопереносом, представляет интерес как для фундаментальных исследований многофазных течений, так и для процессов жидкостной экстракции. При диффузии поверхностно-активного компонента из капли в окружающую жидкость возникающие градиенты межфазного натяжения могут приводить к развитию конвекции Марангони, существенно изменяющей скорость и траекторию движения капли [1-3]. Несмотря на наличие экспериментальных и численных исследований этого явления, частотные характеристики поперечных колебаний капель, особенно в условиях малой разности плотностей фаз, остаются недостаточно изученными. В настоящей работе исследуется влияние начального диаметра и состава многокомпонентной капли на динамику её гравитационного осаждения в воде.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1а. Эксперименты выполнены в вертикальной стеклянной мензурке (*1*) квадратного сечения высотой 27.5 см, шириной 3.5 см, заполненной водой высокой степени очистки, до уровня 27 см. В начале эксперимента на конце иглы (*3*) диаметром 0.4 мм, соединенной со шприцом (*4*), формировалась капля необходимого объема. Отрыв капли производился путем резкого вертикального перемещения иглы электромагнитом (*2*), после чего начиналось ее гравитационное осаждение. Исследуемые капли представляли собой трёхкомпонентную смесь бензола, нитробензола и изопропилового спирта. Бензол и нитробензол образовывали нерастворимую в воде органическую основу капли, тогда как изопропиловый спирт являлся растворимым ПАВом, способным диффундировать из капли в окружающую водную фазу. В работе исследованы капли разных начальных диаметров с массовой концентрацией изопропилового спирта (C = 15, 20, 29.95%). Соотношение бензола и нитробензола подбиралось так, чтобы поддерживать начальный перепад плотности между каплей и водой не более 10^{-3} г/см^3. Движение капли регистрировалось высокоскоростной цифровой камерой UI-3250ML-M-GL (*5*) с частотой 100 кадров/с, установленной на вертикальной подвижной платформе, управляемой шаговым двигателем SMSD-4.2 и генератором сигналов Rigol DG1022. Во время эксперимента камера перемещалась вертикально вниз со скоростью близкой к скорости капли. Внутри мензурки было установлено вертикальное плоское зеркало (*6*), ориентированное под углом 45° к направлению наблюдения, что позволяло одновременно визуализировать две проекции капли, восстанавливая ее пространственную траекторию.

Капля наблюдалась в контровом освещении, создаваемом коллимированным источником рассеянного света (Metaphase Technologies) (*7*). На осветителе, непосредственно перед освещающей поверхностью, была установлена вертикальная рамка (*8*) с тонкими параллельными струнами, изображение которых регистрировалось камерой только в боковой проекции. Возникающие при

растворении спирта в окружающей жидкости неоднородности показателя преломления приводили к искажениям изображения, позволяя качественно визуализировать пространственно-временную эволюцию концентрационного поля в окрестности капли. Эксперименты выполнены при температуре 22±2 °С.

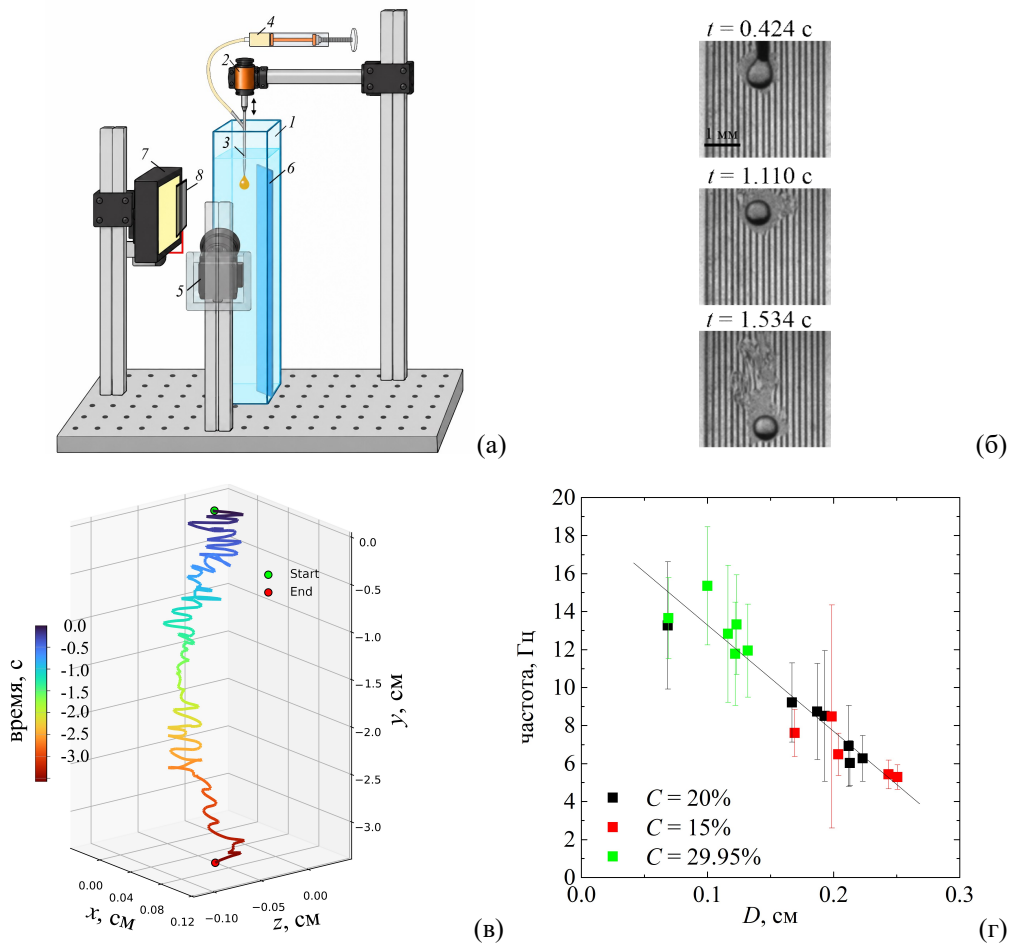


Рис. 1. – Экспериментальная установка (*а*); визуализация эволюции осаждения капли трехкомпонентной смеси с массовой долей спирта в смеси 29.95% (*б*); восстановленная трехмерная траектория капли, изображенной на рисунке 1б (*в*); зависимость средней частоты поперечных колебаний капли от ее диаметра для различного состава смеси (*г*)

Серия изображений капли в моменты создания, отрыва и начала движения представлена на рисунке 1б. Видно, что сразу после формирования капли диффузия ПАВ через межфазную границу приводит к возникновению пространственных неоднородностей концентрации спирта вблизи капли и, как следствие, формированию концентрационной конвекции Марангони, интенсивность и направление которого меняются со временем. После отрыва капли наличие такого нестационарного конвективного движения приводит к колебаниям капли в горизонтальной плоскости и формированию трехмерной траектории движения. Пример, такой траектории представлен на рисунке 1в. Со временем концентрация спирта в капле уменьшается, что приводит к ослаблению интенсивности конвективного движения и выходу капли на прямолинейную траекторию.

Процесс обработки видеозаписи включал процедуру нахождения границ капли на кадре, определение ее формы, площади, координат ее центра в

последовательные моменты времени, восстановление её трехмерной траектории и расчёт вертикальной скорости. Частотные характеристики определялись тремя независимыми методами, включая расчет интервалов между последовательными локальными максимумами горизонтальной координаты, преобразования Фурье и непрерывного вейвлет-преобразования Морле. Анализ временных зависимостей горизонтальной координаты показал, что интервалы между последовательными максимумами изменяются в процессе движения, указывая на нестационарный характер колебаний. Этот же вывод подтвердился после применения непрерывного вейвлет-преобразования Морле, который показал, что распределение спектральной мощности существенно изменяется во времени. По результатам обработки определены средние частоты поперечного движения для капель различных размеров и составов. На рисунке 1г представлена зависимость средней частоты от времени для различных диаметров капель и начальной концентрации спирта. Обнаружено, что средняя частота колебаний уменьшается с увеличением начального диаметра капли. Однозначной зависимости от начальной концентрации спирта не выявлено.

Таким образом, в работе исследовано влияние экстракции ПАВ на гравитационное осаждение капли. Обнаружено развитие осцилляций капли на фоне поступательного движения, обусловленных формированием нестационарной концентрационной конвекции Марангони при диффузии поверхностно-активного компонента через межфазную границу. Изучены пространственно-временные характеристики движения капли в зависимости от ее размеров и начальной концентрации ПАВ. Обзор литературы показывает, что обнаруженные в работе высокочастотные поперечные колебания капли в данной работе описаны впервые.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.11.7.

Литература

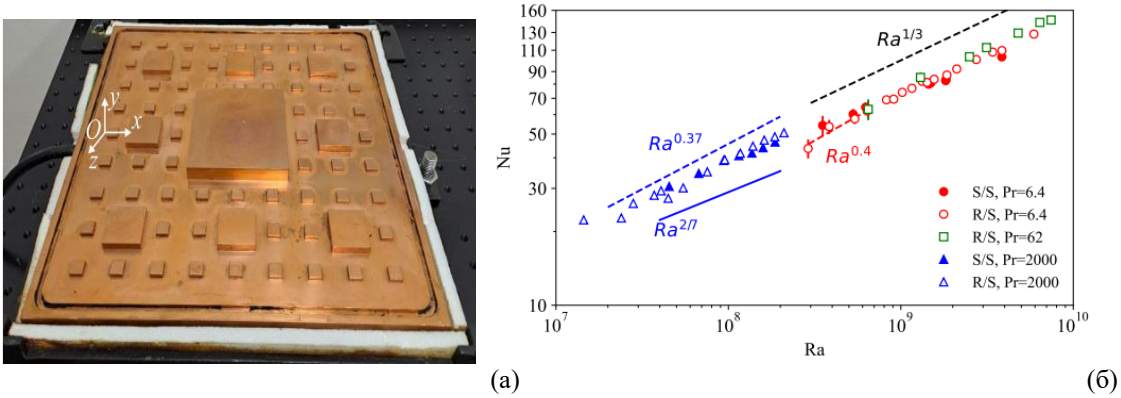
1. Engberg R. F., Wegener M., Kenig E. Y. The influence of Marangoni convection on fluid dynamics of oscillating single rising droplets // Chem. Eng Sci. 2014. Vol. 117. P. 114-124. https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.05.047.
2. Wegener M., Grünig J., Stüber J., Paschedag A. R., Kraume M. Transient rise velocity and mass transfer of a single drop with interfacial instabilities – experimental investigations // Chem. Eng Sci. 2007. Vol. 62. P. 2967-2978. https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.03.003
3. Wegener M., Fèvre M., Paschedag A. R., Kraume M. Impact of Marangoni instabilities on the fluid dynamic behaviour of organic droplets // Int. J. Heat Mass Tran. 2009. Vol. 52. P. 2543-2551. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.11.022

ВЛИЯНИЕ ТИПА И НЕОДНОРОДНОСТИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ДИНАМИКУ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Сухановский А.Н., Васильев А.Ю., Плешков Р.А., Фрик П.Г.

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

Особенностью турбулентной конвекция в замкнутых полостях является формирование крупномасштабной циркуляции (КМЦ) в результате пространственной организации мелкомасштабных тепловых структур. КМЦ вносит основной вклад в конвективный теплоперенос и определяет его пространственное распределение. Поэтому одной из ключевых проблем является возможность интенсификации теплообмена и оптимизация тепловых потоков за счет воздействия на КМЦ. Важной особенностью КМЦ являются инверсии, то есть смены 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. Это обуславливает важность изучения динамики КМЦ. Временное поведение КМЦ может существенно зависеть от условий на границе. В данной работе мы рассматриваем влияние различных граничных условий на динамику КМЦ и интенсивность теплопереноса. Одним из эффективных подходов для усиления теплообмена является шероховатость поверхности. Конвективный теплообмен и структура течения в конвекции Рэлея—Бенара с многомасштабной шероховатой нижней поверхностью были исследованы в широком диапазоне чисел Прандтля (Рис.1).



(а) (б)

Рис. 1. Сложный рельеф дна (а) и зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея для различного рельефа дна и рабочих жидкостей (б).

Заметная тенденция к отклонению от базовой конфигурации с обеими гладкими границами наблюдается, когда толщина теплового пограничного слоя становится меньше высоты препятствий среднего размера. Значительные изменения числа Прандтля не приводят к существенным изменениям показателей степенных законов. Различие в числах Нуссельта для гладких и шероховатых границ заметно,

но составляет менее 15% в широком диапазоне чисел Рэлея и Прандтля. Показано, что структура крупномасштабной циркуляции сильно зависит от числа Прандтля при умеренных значениях числа Рэлея.

Влияние типа граничных условий на динамику КМЦ в квадратной ячейке Рэлея—Бенара исследовано с помощью двумерных длительных численных расчетов для различных значений числа Рэлея Ra. Рассматривались два типа граничных условий: постоянная температура и постоянный тепловой поток. Значительные различия в средних свойствах КМЦ и их временном поведении для различных граничных условий и разных значений числа Прандтля наблюдались только при Ra = 10^6. По мере увеличения Ra зависимость свойств КМЦ от типа граничных условий ослабевает и затем практически исчезает. Таким образом, рост энергии КМЦ и уменьшение отношения теплового и вязкого пограничных слоёв с числом Рэлея снижают чувствительность КМЦ к типу граничных условий.

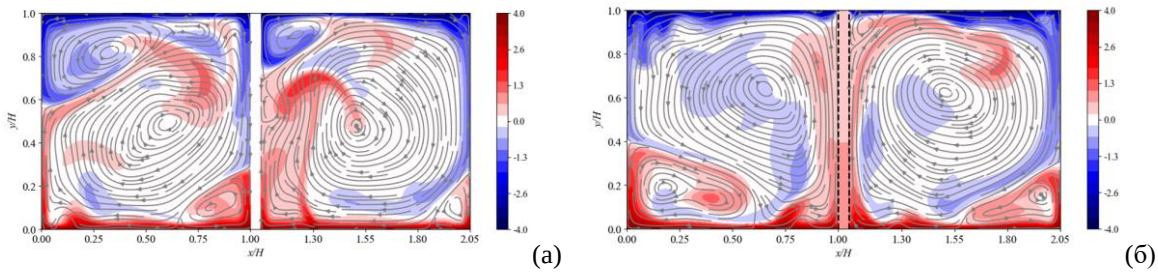


Рис. 2. – Структура КМЦ в случае теплоизолирующей (а) и проводящей (б) границ, цветом показана температура

Исследован турбулентный тепломассобмен в сопряженных полостях. Показано, что материал и толщина стенки, разделяющей полости, оказывает большое влияние на динамику крупномасштабной циркуляции. Тепловое взаимодействие крупномасштабных течений через проводящую стенку приводит к согласованной смене направления конвективных течений в смежных полостях. Обнаруженный эффект необходимо учитывать в случае сложных технологических систем, включающих в себя набор полостей, разделенных металлическими стенками. Согласованная динамика течений в сопряженных полостях может приводить к заметным циклическим тепловым нагрузкам и снижению ресурса различных теплообменных систем, а также резервуаров с жидкими средами, находящихся под воздействием внешней среды. Более подробно результаты изложены в статьях [1-2].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 3.11.8.

Литература

1. Vasiliev A., Sukhanovskii A., Pleshkov R. Prandtl number effects on convective heat transfer and mean flow structure over smooth and rough plates // Europhysics Letters (2026) (accepted)
2. Vasiliev A., Sukhanovskii A. The influence of the type of boundary conditions on the dynamics and characteristics of large-scale convective circulation.// Journal of Fluid Mechanics, (2026) (submitted)

Справочный материал

Направление исследований

Механика новых материалов и конструкций

Оценка прочности и ресурса машин, конструкций и сооружений

Турбулентность, магнитная гидродинамика, тепломассоперенос в многофазных и многокомпонентных средах

Номера задач из плана-графика

3.2.1. Комплексные лабораторно-экспериментальные исследования, направленные на определение рациональных значений параметров гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин, обеспечивающих максимальные значения целевых показателей за счет комплексного использования положительной синергетики, одновременно от структуры конструкции, характеристик встроенной системы мониторинга, значений параметров процесса изготовления.

3.2.2. Разработка схемы и изготовление демонстратора комплексной встроенной системы мониторинга технического состояния для агрегатов/отсеков/фрагментов гипотетической интеллектуальной пробионической конструкции.

3.2.3. Экспериментально-теоретическое исследования, направленные на валидацию эффективности использования встроенной системы мониторинга для гипотетических высоконагруженных агрегатов/отсеков планера пассажирского самолета, строительных сооружений, корпусов машин.

3.3.1. Комплексные экспериментальные исследования деформирования композитных пластин и оболочек при динамических нагрузках с внедренными волоконно-оптическими датчиками.

3.3.2. Создание обучающих и контрольных выборок для обучения и тестирования нейронных сетей, направленных на автоматическую оценку текущего состояния объекта контроля в условиях приложенных динамических нагрузок.

3.3.3. Разработка концепции, создание демонстратора интеллектуальной системы мониторинга механического состояния пластин и оболочек при динамических нагрузках, основанной на волоконно-оптических датчиках и нейронных сетях.

3.3.4. Разработка новых схемы smart-систем с различными типами актуаторов, базирующиеся на результатах численных и экспериментальных исследований.

3.3.5. Разработка модели поликристалла, представительный объем которого сформирован набором одинаковых сдвойникованных мартенситных структур (монокристаллов), по-разному ориентированных в пространстве.

3.4.1. Экспериментальное исследование задачи о сборе остаточной пленки магнитной жидкости с испытуемой детали.

3.4.2. Проектирование макета оснастки для создания магнитожидкостного контакта ультразвукового датчика с оптимальной конфигурацией магнитного поля на основе одного из серийных отечественных дефектоскопов.

3.4.3. Проектирование макета оснастки для сбора остаточной пленки жидкости с испытуемой детали в комплекте с ультразвуковой головкой дефектоскопа.

3.5.1. Экспериментальные исследования деформационного поведения нанокомпозитов при циклических нагрузках с целью уточнения концентраций компонент в наиболее успешных рецептурах.

3.5.2. Анализ причинно-следственных связей между внутренней структурой нанокомпозитов и их физико-механическими свойствами, базирующийся на накопленном экспериментальном материале.

3.5.3. Разработка рецептуры нового материала, пригодного для промышленного освоения.

3.6.1. Теоретическое описание закономерностей формирования остаточных напряжений и искажений геометрии металлической оребренной конструкции, возводимой технологиями аддитивного производства с послойной обработкой давлением, основанное на подходах механики растущего тела и новых экспериментальных способах реконструкции остаточных напряжений.

3.6.2. Проведение экспериментального исследования влияния эффекта проковки поверхностных слоёв (послойной проковки в процессе производства) конструкции, создаваемой технологиями аддитивного производства на усталостный ресурс и коррозионную устойчивость.

3.6.3. Разработка метода расчета кинетики изнашивания неоднородного МДО-покрытия. Аттестационные трибоиспытания покрытий, в том числе при повышенной температуре, для выявления наиболее эффективной системы МДО-покрытие – подложка.

3.6.4. Использование разработанных моделей для анализа влияния остаточных напряжений на контактно-усталостное изнашивание в условиях трения качения и скольжения однородных материалов и материалов с покрытиями.

3.6.5. Исследование влияния геометрических параметров текстуры поверхности на площадь фактического контакта, размеры зон сцепления и проскальзывания (в задаче о трении покоя), деформационный и адгезионный вклады в силу трения (в задаче о трении скольжения) в широком диапазоне внешних нагрузок (в том числе отрицательных). Определение рациональной геометрии текстуры поверхности, обеспечивающей требуемые контактные и фрикционные характеристики конкретных трибосопряжений (например, уплотнений) и при разработке структуры противоскользящих поверхностей.

3.7.1. Разработка концепции и методологии технологии повторной отработки калийных солей.

3.7.2. Опытно-промышленные испытания технологии повторной отработки калийных солей на выбранном участке месторождения.

3.7.3. Проведение геофизического мониторинга состояния повторно подработанного породного массива. Уточнение технических условий, заложенных в разработанную технологию повторной отработки.

3.8.1. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение качественных изменений механизмов переноса импульса в жидкостях при интенсивных воздействиях на основе оригинальных экспериментов по регистрации гидро- и сонолюминесценции, развития кавитации, исследований поведения жидкостей при динамических и ударно-волновых воздействиях с использованием средств высокого пространственно-временного разрешения.

3.8.2. Проведение экспериментальных и теоретических исследований по регистрации акустической эмиссии в нагруженных образцах (элементах конструкций) из композитных материалов с использованием оптоакустического метода, обработке данных с использованием программных комплексов, учитывающих закономерности критичности при стадийности развития поврежденности.

3.9.1. Модернизация математической модели закрученного течения жидкого металла с целью учета сопутствующих неизотермических процессов, численная реализация модернизированной модели и проведение верификационных расчетов.

3.9.2. Определение характеристик взаимодействия закрученных течений для различных конфигураций электромагнитных сил и параметров силового воздействия на основе многовариантных численных расчетов.

3.9.3. Определение характеристик теплообмена в закрученных течениях для различных конфигураций электромагнитных сил и параметров силового воздействия на основе многовариантных численных расчетов.

3.9.4. Разработка конфигурации теплообменника с жидкометаллическим теплоносителем с улучшенными характеристиками.

3.10.1. Многопараметрические численные расчеты с целью определения влияния характеристик воздуха на интенсивность поглощения газообразных примесей калийными солями.

3.10.2. Натурные измерения параметров загазованности и запыленности воздуха в горных выработках рудников различной топологии.

3.10.3. Параметризация математической модели газораспределения в тупиковой выработке и сети горных выработок.

3.10.4. Разработка, программирование и отладка алгоритма решения обратной задачи газораспределения на базе полученного ранее распределения расходов воздуха.

3.11.1. 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 геологическую комбинацию синклинали и антиклинали.

3.11.2. Исследование влияния вибраций на условия устойчивости равновесия вязкоупругой жидкости в замкнутой полости при подогреве снизу.

3.11.3. Исследование влияния вибраций на устойчивость фронта вытеснения в пористой среде, с учетом неньютоновских свойств жидкости и наличия трещин в скелете пористой среды.

3.11.4. Экспериментальное исследование собственных колебаний воздушного пузырька, всплывающего в растворах выбранных ПАВ.

3.11.5. Разработка систем оперативного прогнозирования последствий возможных аварийных ситуаций, связанных с загрязнением поверхностных водных объектов.

3.11.6. Построение математических моделей, пригодных для моделирования процессов производства композитных материалов на основе углеродных волокон.

3.11.7. Динамика поверхностно-активного вещества на искривленной межфазной поверхности в условиях внешнего массопотока.

3.11.8. Турбулентный тепломассобмен в сопряженных полостях.

Научное издание

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях

Отчетная конференция по итогам 3 этапа выполнения проекта
12 – 13 ноября 2026 г. Пермь

Программа и тезисы докладов

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

Подписано в печать 28.10.2026
Формат 60x84 1/16. Усл. п. л. 8,14. Тираж 150 экз.
Заказ 213/2026

«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