

Отчетная конференция по итогам 1 этапа выполнения проекта

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях

5-6 ноября 2024г., 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 1 этапа
выполнения проекта**

5-6 ноября 2024г.

Пермь, 2024

УДК [539.3](063)

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях. Отчетная конференция по итогам 1 этапа выполнения проекта. Пермь, 5-6 ноября 2024г. Программа и тезисы докладов /ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2024. – 171 с.

Представлены программа и тезисы докладов конференции «**Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях. Отчетная конференция по итогам 1 этапа выполнения проекта**», проводимой Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Пермским федеральным исследовательским центром Уральского отделения Российской академии наук 5 - 6 ноября 2024 г.

Сборник отражает тематику конференции и содержит результаты исследований по проекту.

Издается в авторской редакции.

Издается по решению Объединенного Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

Ответственный за выпуск: Н.А. Юрлова

© ИМСС УрО РАН, 2024 г.

© Авторы, 2024 г.

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Основная цель конференции

состоит в подведении итогов 1 этапа выполнения крупного научного проекта по Соглашению с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2024-535 от 23 апреля 2024г.



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

Содержание задач, номера которых указаны в тезисах докладов, приведены в Приложении.

Научный комитет

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

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

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

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

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

Содержание

	Стр.
Общая информация.....	3
Программа конференции.....	9
Тезисы.....	21
Окатьев Р.С., Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Озерных В.С. Математическое моделирование изотермических закрученных течений проводящей жидкости.....	23
Ельтищев В.А., Лосев Г.Л., Фрик П.Г. Экспериментальное исследование вращающегося течения с колеблющейся свободной границей.....	26
Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В., Полуянов А.О. Экспериментальное исследование закрученных течений проводящей жидкости в цилиндрической ячейке с Т-образным сечением	29
Лосев Г.Л., Ельтищев В.А., Фрик П.Г. Измерение характеристик закрученного течения с помощью ультразвукового доплеровского анемометра.....	31
Колесниченко И.В., Окатьев Р.С., Шестаков А.В., Халилов Р.И., Мамыкин А.Д. Использование закрученных течений для перемешивания электропроводных сред	33
Суханов А.Е., Мальцев С.В., Стариков А.Н., Семин М.А., Кузнецова Ю.Л. Построение математической модели кинетики абсорбции и массопередачи газовой примеси воздуха к сорбирующей поверхности.....	35
Коновалов В.В., Кузнецова Ю.Л. Модель сорбции газа водорастворимыми аэрозольными частицами.....	37
Семин М.А., Любимова Т.П., Иванцов А.О., Исаевич А.Г., Суханов А.Е., Файнбург Г.З., Таций А.В., Левин Л.Ю., Накаряков Е.В. Математическое моделирование неізотермического турбулентного течения газозоудушной смеси по данным серии измерений параметров воздушного потока в тупиковых выработках.....	39
Бублик С.А., Мальцев С.В., Козунин И.И., Семин М.А. Проведение многопараметрического моделирования вентиляции добычной панели с вентиляторами-эжекторами, построение аппроксимирующих параметрических зависимостей.....	41
Козунин И.И., Мальцев С.В., Семин М.А., Левин Л.Ю. Оптимизация параметров и формулировка принципов проветривания добычной панели вентиляторами-эжекторами.....	44
Любимова Т.П., Прокопьев С.А. Устойчивость квазиравновесия наклонного слоя бинарной жидкости под действием высокочастотных вибраций.....	46
Любимова Т.П., Садилов Е.С. Конвективные движения около твердого включения в пористой среде, насыщенной жидкостью, при нагреве сверху.....	48
Любимова Т.П., Шубенков И.С., Ожгибесова Н.А. Конвекция Соре в слоистой пористой среде, моделирующей антиклинальную геологическую складку.....	51
Шарифулин В.А., Белобородов Ф.С., Шарифулин А.Н., Любимова Т.П. Влияние низкочастотных осцилляций крышки на структуру конвективного течения в квадратной полости.....	54
Любимова Т.П., Казимарданов М.Г. Влияние вибраций на возникновение	56

конвективного движения вязкопластической жидкости в замкнутой области.....	
Клименко Л.С., Марышев Б.С. Концентрационная конвекция в горизонтальном слое пористой среды в рамках обобщенной модели Козени- Кармана.....	58
Алабужев А.А. Динамика скачкообразного движения зажатой капли.....	61
Иванцов А.О., Любимова Т.П. Исследование влияния вибраций на двухфазную фильтрацию в трещиновато-пористой среде. Численный эксперимент.....	63
Кучинский М.О., Галишевский В.А., Садовникова А.Д., Кирпичев В.А., Устюгов М.Д., Любимова Т.П. Экспериментальное и численное исследования движения капли в пористой среде.....	65
Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н. Особенности формирования скачка плотности при слиянии рек.....	68
Марышев Б.С., Клименко Л.С. Нефииковский транспорт пассивных частиц в стационарных вихревых потоках.....	71
Мизев А.И., Брацун Д.А., Краснякова Е.А., Сираев Р.Р., Шмыров А.В. Автоколебания в проточном микроканале индуцированные концентрационным эффектом Марангони	74
Брацун Д.А., Мизев А.И., Краснякова Е.А., Сираев Р.Р. Активное управление реакционными процессами в проточном микрореакторе за счет эффекта Марангони	77
Денисова М.О., Костарев К.Г. Реакция нейтрализации в капле, поглощающей химически активный ПАВ из его однородного раствора.....	80
Сухановский А.Н., Васильев А.Ю., Попова Е.Н. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена в случае сложного рельефа.....	83
Вшивков А.Н., Гачегова Е.А., Бартоломей М.Л., Пантелеев И.А., Плехов О.А. Разработка методики дизайна остаточных напряжений при лазерном ударном упрочнении	85
Пойлов В.З., Казанцев А.Л., Смирнов С.А. Программа испытаний коррозионной стойкости авиационных сплавов с учетом поверхностных остаточных напряжений	88
Изюмова А.Ю., Ложкин Д.В., Кудряшев И.С. Определение степени наводораживания поверхности материала после лазерного ударного упрочнения и ее возможного влияния на усталостные свойства.....	91
Дудин Д.С., Келлер И.Э., Петухов Д.С. Модель высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии жаропрочных сплавов с учётом напряжений.....	94
Торская Е.В., Шкалей И.В., Морозов А.В., Степанов Ф.И., Малышев В.Н. Исследование механических свойств и разрушения при трении модифицированных МДО покрытий	96
Горячева И.Г., Яковенко А.А. Разработка алгоритма оценки влияния остаточных напряжений на накопление контактно-усталостных повреждений (КУП) в однородном материале в условиях трения качения	98
Маховская Ю.Ю., Цуканов И.Ю., Любичева А.Н. моделирование трения покоя для текстурированных поверхностей в контакте с упругим телом	101
Барях А.А., Цаюков А.А., Самоделкина Н.А. Модели упруго-вязкопластического деформирования соляных пород.....	104
Паньков И.Л., Ударцев А.А., Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В. О результатах комплексных	108

квазистатических и реологических испытаний соляных пород в лабораторных условиях.....	
Девятков С.Ю., Ломакин И.С., Федосеев А.К. Эволюция напряженно-деформированного состояния водозащитной толщи в процессе ее деформирования	111
Наймарк О.Б., Юрина А.Д. Автомодельные закономерности стадийности пластической деформации и разрушения.....	114
Князев Н.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б. «Щелевые состояния» и механизмы переноса импульса в вязкоупругих средах.....	117
Баяндин Ю.В., Савельева Н.В., Наймарк О.Б. Модель накопления повреждений при циклическом нагружении материалов авиационного моторостроения и ракетной техники.....	119
Оборин В.А., Банников М.В., Наймарк О.Б. Кинетические закономерности роста усталостной трещины при сверхмногоциклового усталости.....	122
Банников М.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Анализ стадийности усталостного разрушения в сплавах титана и алюминия по спектру колебаний свободного торца в гигацикловом режиме.....	124
Юрина А.Д., Уваров С.В. Цифровая обработка сигналов PDV при динамическом нагружении графита.....	126
Уваров С.В., Банников М.В., Оборин В.А. Методика испытания образцов из хромоникелевого сплава 42ХНМ на сверхмногоцикловую усталость при повышенных температурах.....	128
Дубовиков Е.А., Шаныгин А.Н. Расчетные исследования зависимости положительной синергии на прочность слоистых композитов от локального и общего отклонения волокон в монослоях.....	130
Марескин И.В. Расчетные параметрические исследования синергетического эффекта от взаимодействия на мезоуровне основных компонентов высоконагруженных осесимметричных композитных оболочек с про-бионическими КСС.....	132
Миргородский Ю.С. Параметрическое численное исследование деформирования и повреждения высоконагруженных про-бионических конструкций на локальном уровне с учётом нелинейного поведения конструкции.....	134
Фомин Д.Ю. Исследования синергетического эффекта от взаимодействия компонентов перспективных металло-композитных стыков с целью повышения прочностных, жесткостных и весовых характеристик.....	136
Шаныгин А.Н. Разработка принципов формирования легких и надежных высоконагруженных интеллектуальных про-бионических конструкций на четырех уровнях структурной детализации с учетом технологических требований.....	138
Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Сенин А.Н. Колебания электроупругих тонкостенных конструкций, находящихся под действием статической нагрузки.....	140
Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П. Подходы к моделированию конструкций с актуаторами из сплавов с памятью формы.....	143
Матвеев В.П., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б. Перспективы использования волоконно-	145

оптических датчиков для изучения механических свойств льда.....	
Роговой А.А., Столбова О.С. Микроструктурная модель процессов двойникования и раздвойникования мартенситной структуры в ферромагнитном сплаве с памятью формы в магнитном поле.....	147
Лебедев А.В., Лысенко С.Н. Синтез магнитных жидкостей на основе безопасных жидкостей-носителей, обладающих низкой (до минус 60 0С) температурой замерзания	149
Иванов А.С., Сомов С.А. Экспериментальный метод измерения бинадальной кривой магнитной жидкости при температурно- или магнитоуправляемой агрегации частиц	152
Сомов С.А., Косков М.А., Иванов А.С., Степанов Г.В. Вибрационные испытания демпфера на основе эластомера с порошковым наполнителем из магнитомягкого материала.....	155
Беляев А.Ю., Мохирева К.А., Свистков А.Л. Экспериментальное определение механических свойств нанокомпозитов, связующим которых является бутадиен-стирольный каучук с наполнителями различного состава и объемной доли.....	158
Мохирева К.А., Свистков А.Л. Сравнительный анализ полученных данных о механических свойствах нанокомпозитов с целью установления связи между рецептурой материалов и их механическими свойствами.....	160
Изюмов Р.И., Морозов И.А., Свистков А.Л. Разработка методики использования нейросетей для обработки экспериментальных данных атомно-силовой микроскопии новых нанокомпозитов. Создание базы данных о микроструктуре различных нанокомпозитов и формирование обучающей выборки.....	163
Приложение	166

Программа



5 ноября

9:20 - 09:30

Открытие работы конференции

Председатель: Матвеев Валерий Павлович

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

Заседание 1. Разработка научных основ устройств и технологий использования жидкометаллического теплоносителя в ядерной энергетике

Ведущий: Фрик Петр Готлобович

9:30 – 9:40	Окатыев Р.С., Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Озерных В.С. Математическое моделирование изотермических закрученных течений проводящей жидкости Докладчик: Окатыев Роман Сергеевич
9:40 – 9:50	Ельтищев В.А., Лосев Г.Л., Фрик П.Г. Экспериментальное исследование вращающегося течения с колеблющейся свободной границей Докладчик: Ельтищев Владислав Андреевич
9:50 – 10:00	Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В., Полуянов А.О. Экспериментальное исследование закрученных течений проводящей жидкости в цилиндрической ячейке с Т-образным сечением Докладчик: Мамыкин Андрей Дмитриевич
10:00 – 10:10	Лосев Г.Л., Ельтищев В.А., Фрик П.Г. Измерение характеристик закрученного течения с помощью ультразвукового доплеровского анемометра Докладчик: Лосев Геннадий Леонидович
10:10 – 10:20	Колесниченко И.В., Окатыев Р.С., Шестаков А.В., Халилов Р.И., Мамыкин А.Д. Использование закрученных течений для перемешивания электропроводных сред Докладчик: Колесниченко Илья Владимирович
10:20 – 10:30	Обсуждение представленных докладов

Заседание 2 Разработка моделей газодинамики и тепломассообмена в подземных горных выработках

Ведущий: Любимова Татьяна Петровна

10:30 – 10:40	Суханов А.Е., Мальцев С.В., Стариков А.Н., Семин М.А., Кузнецова Ю.Л. Построение математической модели кинетики абсорбции и массопередачи газовой примеси воздуха к сорбирующей поверхности Докладчик: Суханов Андрей Евгеньевич
10:40 – 10:50	Коновалов В.В., Кузнецова Ю.Л. Модель сорбции газа водорастворимыми аэрозольными частицами Докладчик: Коновалов Владимир Владиславович
10:50 – 11:00	Семин М.А., Любимова Т.П., Иванцов А.О., Исаевич А.Г., Суханов А.Е., Файнбург Г.З., Таций А.В., Левин Л.Ю., Накаряков Е.В. Математическое моделирование неизоэтермического турбулентного течения газозоудшной смеси по данным серии измерений параметров воздушного потока в тупиковых выработках Докладчик: Семин Михаил Александрович
11:00 – 11:10	Бублик С.А., Мальцев С.В., Козунин И.И., Семин М.А. Проведение многопараметрического моделирования вентиляции добычной панели с вентиляторами-эжекторами, построение аппроксимирующих параметрических зависимостей Докладчик: Семин Михаил Александрович
11:10 – 11:20	Козунин И.И., Мальцев С.В., Семин М.А., Левин Л.Ю. Оптимизация параметров и формулировка принципов проветривания добычной панели вентиляторами-эжекторами Докладчик: Левин Лев Юрьевич
11:20 – 11:30	Обсуждение представленных докладов

11:30 – 12:00

Кофе-брейк

Заседание 3 Развитие моделей конвективного тепломассопереноса в многофазных и многокомпонентных средах, в насыщенных многокомпонентными смесями неоднородных пористых средах

Ведущий: Мизев Алексей Иванович

12:00 – 12:10	Любимова Т.П., Прокопьев С.А. Устойчивость квазиравновесия наклонного слоя бинарной жидкости под действием высокочастотных вибраций Докладчик: Прокопьев Сергей Анатольевич
12:10 – 12:20	Любимова Т.П., Садилов Е.С. Конвективные движения около твердого включения в пористой среде, насыщенной жидкостью,

	при нагреве сверху Докладчик: Садилов Евгений Сергеевич
12:20 – 12:30	Любимова Т.П., Шубенков И.С., Ожгибесова Н.А. Конвекция Соре в слоистой пористой среде, моделирующей антиклинальную геологическую складку Докладчик: Шубенков Иван Сергеевич
12:30 – 12:40	Шарифулин В.А., Белобородов Ф.С., Шарифулин А.Н., Любимова Т.П. Влияние низкочастотных осцилляций крышки на структуру конвективного течения в квадратной полости Докладчик: Шарифулин Вадим Альбертович
12:40 – 12:50	Любимова Т.П., Казимарданов М.Г. Влияние вибраций на возникновение конвективного движения вязкопластической жидкости в замкнутой области Докладчик: Любимова Татьяна Петровна
12:50 – 13:00	Клименко Л.С., Марышев Б.С. Концентрационная конвекция в горизонтальном слое пористой среды в рамках обобщенной модели Козени- Кармана Докладчик: Клименко Людмила Сергеевна

13:00 – 14:00

Обед

Заседание 3 Развитие моделей конвективного теплопереноса в многофазных и многокомпонентных средах, в насыщенных многокомпонентными смесями неоднородных пористых средах (продолжение)

Ведущий: Любимова Татьяна Петровна

14:00 – 14:10	Алабужев А.А. Динамика скачкообразного движения зажатой капли Докладчик: Алабужев Алексей Анатольевич
14:10 – 14:20	Иванцов А.О., Любимова Т.П. Исследование влияния вибраций на двухфазную фильтрацию в трещиновато-пористой среде. Численный эксперимент Докладчик: Иванцов Андрей Олегович
14:20 – 14:30	Кучинский М.О., Галишевский В.А., Садовникова А.Д., Кирпичев В.А., Устюгов М.Д., Любимова Т.П. Экспериментальное и численное исследования движения капли в пористой среде Докладчик: Кучинский Михаил Олегович
14:30 – 14:40	Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н. Особенности формирования скачка плотности при слиянии рек Докладчик: Паршакова Янина Николаевна
14:40 – 14:50	Марышев Б.С., Клименко Л.С. Нефиковский транспорт пассивных частиц в стационарных вихревых потоках

	Докладчик: Марышев Борис Сергеевич
14:50 – 15:00	Мизев А.И., Брацун Д.А., Краснякова Е.А., Сираев Р.Р., Шмыров А.В. Автоколебания в проточном микроканале индуцированные концентрационным эффектом Марангони Докладчик: Мизев Алексей Иванович
15:00 – 15:10	Брацун Д.А., Мизев А.И., Краснякова Е.А., Сираев Р.Р. Активное управление реакционными процессами в проточном микрореакторе за счет эффекта Марангони Докладчик: Брацун Дмитрий Анатольевич
15:10 – 15:20	Денисова М.О., Костарев К.Г. Реакция нейтрализации в капле, поглощающей химически активный ПАВ из его однородного раствора Докладчик: Денисова Мария Олеговна
15:20 – 15:30	Сухановский А.Н., Васильев А.Ю., Попова Е.Н. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена в случае сложного рельефа Докладчик: Сухановский Андрей Николаевич
15:30 – 15:40	Обсуждение представленных докладов

15:40 – 16:00

Кофе-брейк

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

Заседание 4 Оптимизация метода лазерной ударной проковки металлов и сплавов

Ведущий: Плехов Олег Анатольевич

16:00 – 16:10	Вшивков А.Н., Гачегова Е.А., Бартоломей М.Л., Пантелеев И.А., Плехов О.А. Разработка методики дизайна остаточных напряжений при лазерном ударном упрочнении Докладчик: Вшивков Алексей Николаевич
16:10 – 16:20	Пойлов В.З., Казанцев А.Л., Смирнов С.А. Программа испытаний коррозионной стойкости авиационных сплавов с учетом поверхностных остаточных напряжений Докладчик: Пойлов Владимир Зотович
16:20 – 16:30	Изюмова А.Ю., Ложкин Д.В., Кудряшев И.С. Определение степени наводораживания поверхности материала после лазерного ударного упрочнения и ее возможного влияния на усталостные свойства Докладчик: Изюмова Анастасия Юрьевна
16:30 – 16:40	Дудин Д.С., Келлер И.Э., Петухов Д.С. Модель высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии

	жаропрочных сплавов с учётом напряжений Докладчик: Дудин Дмитрий Сергеевич
16:40 – 16:50	Торская Е.В., Шкалей И.В., Морозов А.В., Степанов Ф.И., Малышев В.Н. Исследование механических свойств и разрушения при трении модифицированных МДО покрытий Докладчик: Торская Елена Владимировна
16:50 – 17:00	Горячева И.Г., Яковенко А.А. Разработка алгоритма оценки влияния остаточных напряжений на накопление контактно-усталостных повреждений (КУП) в однородном материале в условиях трения качения Докладчик: Яковенко Анастасия Александровна
17:00 – 17:10	Маховская Ю.Ю., Цуканов И.Ю., Любичева А.Н. моделирование трения покоя для текстурированных поверхностей в контакте с упругим телом Докладчик: Цуканов Иван Юрьевич
17:10 – 17:20	Обсуждение представленных докладов

6 ноября

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

Заседание 5 Разработка научных основ технологии повторной отработки запасов полезных ископаемых

Ведущий: Барях Александр Абрамович

9:30 – 9:40	Барях А.А., Цаюков А.А., Самоделкина Н.А. Модели упруго-вязкопластического деформирования соляных пород Докладчик: Цаюков Андрей Андреевич
9:40 – 9:50	Паньков И.Л., Ударцев А.А., Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В. О результатах комплексных квазистатических и реологических испытаний соляных пород в лабораторных условиях Докладчик: Ударцев Артем Александрович
9:50 – 10:00	Девятков С.Ю., Ломакин И.С., Федосеев А.К. Эволюция напряженно-деформированного состояния водозащитной толщи в процессе ее деформирования Докладчик: Федосеев Антон Кимович
10:00 – 10:10	Обсуждение представленных докладов

Заседание 6 Разработка фундаментальных основ методологии прогнозирования свойств, ресурса и мониторинг состояния сложных инженерных и природных систем

Ведущий: Наймарк Олег Борисович

10:10 – 10:20	Наймарк О.Б., Юрина А.Д. Автомодельные закономерности стадийности пластической деформации и разрушения Докладчик: Наймарк Олег Борисович
10:20 – 10:30	Князев Н.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б. «Щелевые состояния» и механизмы переноса импульса в вязкоупругих средах Докладчик: Князев Никита Андреевич
10:30 – 10:40	Баяндин Ю.В., Савельева Н.В., Наймарк О.Б. Модель накопления повреждений при циклическом нагружении материалов авиационного моторостроения и ракетной техники Докладчик: Баяндин Юрий Витальевич
10:40 – 10:50	Оборин В.А., Банников М.В., Наймарк О.Б. Кинетические закономерности роста усталостной трещины при сверхмногоцикловой усталости

	Докладчик: Оборин Владимир Александрович
10:50 – 11:00	Банников М.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Анализ стадийности усталостного разрушения в сплавах титана и алюминия по спектру колебаний свободного торца в гигацикловом режиме Докладчик: Банников Михаил Владимирович
11:00 – 11:10	Юрина А.Д., Уваров С.В. Цифровая обработка сигналов PDV при динамическом нагружении графита Докладчик: Юрина Александра Денисовна
11:10 – 11:20	Уваров С.В, Банников М.В. Оборин В.А. Методика испытания образцов из хромоникелевого сплава 42ХНМ на сверхмногоцикловую усталость при повышенных температурах Докладчик: Уваров Сергей Витальевич
11:20 – 11:30	Обсуждение представленных докладов
11:30 – 12:00	Кофе-брейк

Секция «Механика новых материалов и конструкций»

Заседание 7 Создание пробионических композитных конструкций и подходов к мониторингу их технического состояния на базе оптоволоконных датчиков

Ведущий: Матвеев Валерий Павлович

12:00 – 12:10	Дубовиков Е.А., Шаныгин А.Н. Расчетные исследования зависимости положительной синергии на прочность слоистых композитов от локального и общего отклонения волокон в монослоях Докладчик: Шаныгин Александр Николаевич
12:10 – 12:20	Марескин И.В. Расчетные параметрические исследования синергетического эффекта от взаимодействия на мезоуровне основных компонентов высоконагруженных осесимметричных композитных оболочек с про-бионическими КСС Докладчик: Марескин Иван Владимирович
12:20 – 12:30	Миргородский Ю.С. Параметрическое численное исследование деформирования и повреждения высоконагруженных про-бионических конструкций на локальном уровне с учётом нелинейного поведения конструкции Докладчик: Миргородский Юрий Сергеевич
12:30 – 12:40	Фомин Д.Ю. Исследования синергетического эффекта от взаимодействия компонентов перспективных металло-композитных стыков с целью повышения прочностных, жесткостных и весовых характеристик

	Докладчик: Фомин Данил Юрьевич
12:40 – 13:00	Шаныгин А.Н. Разработка принципов формирования легких и надежных высоконагруженных интеллектуальных пробиотических конструкций на четырех уровнях структурной детализации с учетом технологических требований Докладчик: Шаныгин Александр Николаевич
13:00 – 13:10	Обсуждение представленных докладов

13:10 – 14:00	Обед
---------------	------

Заседание 8 Теоретические и экспериментальные исследования smart-материалов и систем мониторинга с использованием технологий нейронных сетей

Ведущий: Матвеев Валерий Павлович

14:00 – 14:10	Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Сенин А.Н. Колебания электроупругих тонкостенных конструкций, находящихся под действием статической нагрузки Докладчик: Лекомцев Сергей Владимирович
14:10 – 14:20	Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П. Подходы к моделированию конструкций с актуаторами из сплавов с памятью формы Докладчик: Каменских Александр Олегович
14:20 – 14:30	Матвеев В.П., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б. Перспективы использования волоконно-оптических датчиков для изучения механических свойств льда Докладчик: Сероваев Григорий Сергеевич
14:30 – 14:40	Роговой А.А., Столбова О.С. Микроструктурная модель процессов двойникования и раздвойникования мартенситной структуры в ферромагнитном сплаве с памятью формы в магнитном поле Докладчик: Столбова Ольга Серафимовна
14:40 – 14:50	Обсуждение представленных докладов

Заседание 9 Синтез низкотемпературных магнитных жидкостей. Разработка технологии низкотемпературного ультразвукового контроля с применением магнитожидкостного акустического контакта

Ведущий: Райхер Юрий Львович

14:50 – 15:00	Лебедев А.В., Лысенко С.Н. Синтез магнитных жидкостей на основе безопасных жидкостей-носителей, обладающих низкой (до минус 60 0С) температурой замерзания Докладчик: Лебедев Александр Владимирович
---------------	---

15:00 – 15:10	Иванов А.С., Сомов С.А. Экспериментальный метод измерения бинадальной кривой магнитной жидкости при температурно- или магнитоуправляемой агрегации частиц Докладчик: Иванов Алексей Сергеевич
15:10 – 15:20	Сомов С.А., Косков М.А., Иванов А.С., Степанов Г.В. Вибрационные испытания демпфера на основе эластомера с порошковым наполнителем из магнитомягкого материала Докладчик: Сомов Сергей Андреевич
15:20 – 15:30	Обсуждение представленных докладов

15:30 – 15:50	Кофе-брейк
---------------	------------

Заседание 10 Определение механических свойств и построение моделей деформирования новых эластомерных нанокомпозитов

Ведущий: Келлер Илья Эрнстович

15:50 – 16:00	Беляев А.Ю., Мохирева К.А., Свистков А.Л. Экспериментальное определение механических свойств нанокомпозитов, связующим которых является бутадиен-стирольный каучук с наполнителями различного состава и объемной доли Докладчик: Беляев Антон Юрьевич
16:00 – 16:10	Мохирева К.А., Свистков А.Л. Сравнительный анализ полученных данных о механических свойствах нанокомпозитов с целью установления связи между рецептурой материалов и их механическими свойствами Докладчик: Мохирева Ксения Александровна
16:10 – 16:20	Изюмов Р.И., Морозов И.А., Свистков А.Л. Разработка методики использования нейросетей для обработки экспериментальных данных атомно-силовой микроскопии новых нанокомпозитов. Создание базы данных о микроструктуре различных нанокомпозитов и формирование обучающей выборки Докладчик: Изюмов Роман Игоревич
16:20 – 16:30	Обсуждение представленных докладов
16:30 – 17:00	Подведение итогов. Закрытие конференции Председатель: Матвеев Валерий Павлович

Тезисы доклада



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ

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

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

Генерация течений жидких металлов с помощью электромагнитного воздействия широко используется в энергетике и металлургической промышленности. К примеру, течение, образующееся во время кристаллизации, может значительно улучшить свойства полученного слитка (однородность распределения примеси, однородность размера зерна). Зачастую для электромагнитного перемешивания расплава в цилиндрическом тигле используют воздействие на жидкий металл переменным вращающимся магнитным полем (ВМП). Однако генерируемое таким способом течение имеет слабую полоидальную составляющую, что приводит к возникновению застойных зон и, как следствие, к неоднородному перемешиванию примеси и распределению температуры [1]. Одним из способов, позволяющим усилить полоидальное течение, является совместное использование вращающегося магнитного поля вместе с бегущим магнитным полем (БМП). Такой подход позволяет повысить степень гомогенизации получаемых слитков, однако и он не лишен существенных технологических недостатков. Такая схема также увеличивает размеры и вес установки и ограничивает возможность изготовления секционированного индуктора. Кроме того, создаваемое в результате такого воздействия течение генерирует только крупномасштабную циркуляцию. Таким образом, задача нахождения других способов усложнения топологии переменного магнитного поля и, как следствие, течения, для достижения еще более эффективного перемешивания жидкого металла в цилиндрической ячейке, является актуальной.

В рамках работы рассматривается конфигурация перемешивателя, состоящего из шести индукторов, генерирующих вращающееся магнитное поле и расположенных друг над другом. Рассматриваются две принципиально разные конфигурации генерируемых магнитных полей. В первой конфигурации все шесть катушек генерируют ВМП, направление вращения которых одинаково. Во второй конфигурации направления вращения ВМП чередуются. Здесь и далее в тексте мы будем обозначать конфигурацию однородно вращающегося магнитного поля как $RMF1$, а конфигурацию с чередующимися направлениями вращения магнитного поля как $RMF2$. Схематичное представление конфигураций магнитного поля и генерируемых течений представлено на рисунке 1.

Для исследования процессов генерации течения в указанных конфигурациях и определения характеристик получаемых течений используется математическое моделирование. Математическая модель основывается на уравнениях электродинамики сплошных сред и гидродинамики. Предварительные оценки показывают, что индуцируемое движением проводящей жидкости магнитное поле мало, что позволяет решать задачу в рамках электродинамического приближения. В такой постановке оказывается возможным разделить электродинамическую и гидродинамические составляющие задачи. В рамках электродинамической подзадачи решаются уравнения электродинамики, записанные в терминах скалярного и векторного потенциалов. В результате определяется распределение магнитного поля и вычисляется электромагнитная сила. В гидродинамической подзадаче рассматривается течение жидкого металла в цилиндрической ячейке высотой 300 мм и

радиусом 100 мм. Поток создается электромагнитной силой, которая была посчитана в результате решения электромагнитной подзадачи.

Электродинамическая подзадача решалась методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS Emag. Расчетная геометрия электродинамической подзадачи содержала катушки, ферромагнитные сердечники, ячейку с жидким металлом и окружающее пространство в непосредственной близости от индуктора. Использовалась нерегулярная тетраэдрическая сетка. Приблизительное число элементов сетки электромагнитной подзадачи составило $5 \cdot 10^5$. В качестве варьируемых параметров в расчетах были выбраны амплитуда тока в катушках и угловая частота вращающегося магнитного поля. Гидродинамическая подзадача решалась методом конечных объемов, реализованным в программном комплексе ANSYS Fluent. Сетка гидродинамической подзадачи состояла из $2,7 \cdot 10^5$ элементов со сгущением вблизи боковых стенок. В расчетах использовались значения параметров жидкого металла, соответствующие эвтектическому сплаву Ga-Sn-Zn. Использовалась SST $k-\omega$ модель турбулентности. Перенос данных с электродинамической сетки на гидродинамическую осуществлялся с помощью скрипта собственной разработки на языке Python. Верификация математической модели выполнена на результатах трех экспериментов, описанных в [2, 3].

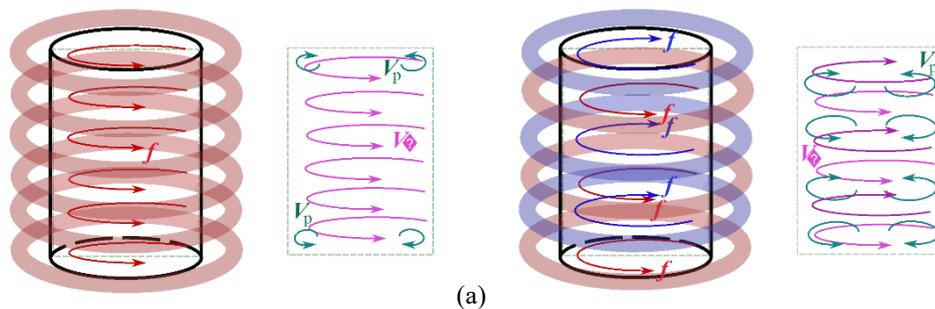


Рис. 1. - Схема конфигураций вращающегося магнитного поля (слева – индуктор и ячейка, справа – полоидальная V_p и тороидальная V_ϕ компоненты скорости в осевом сечении): (а) – однородно вращающееся магнитное поле, «RMF1», (б) – переменнo-вращающееся магнитное поле с чередующимися направлениями вдоль оси, «RMF2»

С помощью численного моделирования выполнено сравнение гидродинамических процессов, происходящих при двух конфигурациях ВМП. Для оценки интенсивности воздействия электромагнитной силы используется безразмерное число Тейлора

$$Ta = \frac{\sigma \omega B^2 R^4}{2\rho \nu^2},$$

где σ – электропроводность жидкости, ω – угловая частота вращающегося магнитного поля, R – радиус цилиндрической ячейки, B – амплитуда магнитной индукции, ρ – плотность жидкости, ν – кинематическая вязкость жидкости. Для количественного сравнения интенсивности полоидальных и тороидальных компонент течения жидкого металла рассчитывается энергия каждой компоненты

$$E_{pol} = \int_V (v_r^2 + v_z^2) dV, \quad E_{tor} = \int_V v_\phi^2 dV,$$

где v_r , v_z и v_ϕ – радиальная, аксиальная и тороидальная компоненты скорости.

В результате моделирования выявлено, что электромагнитное воздействие в конфигурации RMF2 значительно усложняет тороидальную и полоидальную составляющие течения жидкого металла в цилиндрической ячейке. Чередование направлений вращения магнитного поля позволяет генерировать осциллирующее полоидальное течение во всем объеме ячейки.

Возникающее течение сопровождается колебательными движениями вихревых структур и их взаимодействием на относительно малых пространственных масштабах из-за развития гидродинамических неустойчивостей в областях, где направление вращения магнитного поля терпит разрыв. При этом интенсивность полоидального течения практически равна интенсивности тороидального течения, о чем свидетельствует соотношение кинетических энергий компонентов течения.

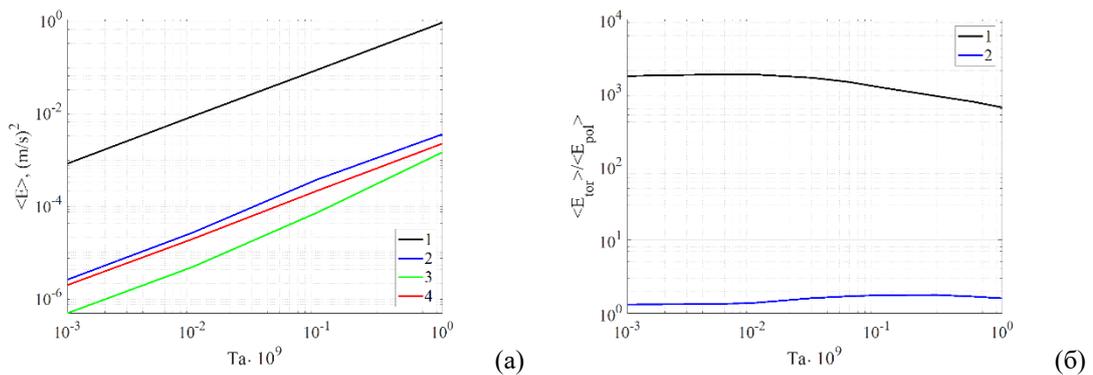


Рис. 2. - (а) Зависимость средней энергии от числа Тейлора: 1 – E_{tor} для конфигурации «RMF1», 2 – E_{tor} для конфигурации «RMF2», 3 – E_{pol} для конфигурации «RMF1», 4 – E_{pol} для конфигурации «RMF2»; (б) Отношение тороидальной и полоидальной энергий как функция числа Тейлора: 1, 2 – конфигурации «RMF1» и «RMF2» соответственно

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.9.1.

Литература

1. Branover H., Golbraikh E., Kapusta A., Mikhailovich B., Dardik I., Thompson R., Lesin S., Khavkin M. On the potentialities of intensification of electromagnetic stirring of melts // *Magnetohydrodynamics*. 2006. Vol. 42. P. 291-298.
2. Колесниченко И., Мамыкин А., Халилов Р. Электромагнитный перемешиватель жидкого металла: верификация электромагнитной части задачи // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2022. № 4. С. 45-51. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2022-4-45-51>
3. Озерных В.С., Лосев Г. Л., Гольбрайх Е., Колесниченко И.В. Начальная стадия формирования вихревого течения в индукторе с вращающимися встречно магнитными полями // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2023. Т. 16, № (4). С. 493-503. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.4.41>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ С КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ

Ельтищев В.А., Лосев Г.Л., Фрик П.Г.

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

Закрученные потоки электропроводящих жидкостей играют важную роль в различных технологических устройствах и производственных процессах, например при литье металлов и сплавов. А наличие свободной поверхности вносит дополнительные сложности в изучении физики процессов. Стабильность поверхностей жидких металлов является существенной проблемой крупномасштабных технологических жидкометаллических устройств, таких как алюминиевые электролизеры [1, 2]. Сильные токи, протекающие в электролизерах, генерируют поверхностные волны, которые могут приводить к коротким замыканиям. В последние годы устойчивость поверхности жидких металлов под действием сильного электрического тока стала широко обсуждаемой проблемой в контексте создания жидкометаллических накопителей электроэнергии больших объемов, которые разрабатывались как перспективный кандидат для крупномасштабного хранения электроэнергии [3, 4]. В таких устройствах прохождение высокого электрического тока через границу раздела создает сильную поверхностную волну, которая может вызвать значительные повреждения в многослойной системе. В случае цилиндрического сосуда эта волна возникает в жидком металле в виде наклона межфазной границы, которая вращается вокруг оси ячейки. В недавней работе было показано, что такую круговую поверхностную волну (КПВ) можно наблюдать в неподвижной цилиндрической ячейке с центральным нижним и верхним кольцевым электродами в условиях аксиально приложенного постоянного магнитного поля [5].

Проведение экспериментальных исследований закрученных потоков проводящей жидкости для определения характеристик протекающих процессов и зависимости интенсивности закрутки потока от параметров силового воздействия осуществляется на следующей экспериментальной установке (см. рис. 1). Она представляет собой цилиндрическую ячейку (1) из нержавеющей стали с внутренним радиусом $R=100$ мм и высотой 150 мм. Дно ячейки (3) выполнено из оргстекла и плотно соединено с боковой стенкой. Нижняя часть внутренней поверхности (2) стенки ячейки изолирована на высоту 80 мм. Ячейка заполнена сплавом галлия GaZnSn (4) до уровня $h_0=74$ мм (на 6 мм ниже границы изоляции). В верхнюю часть ячейки непрерывно подается аргон для минимизации окисления свободной поверхности жидкого металла. Дно из плексигласа имеет восемь шлюзов для датчиков ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) (8), расположенных на расстоянии $r=90$ мм от центральной оси ячейки. УДА DOP5000 позволяет измерять профили вертикальных составляющих скорости $V_z(z)$ и отраженных от фазовых границ эхо-сигналов. Для регистрации положения свободной границы жидкого металла вокруг внешней стороны стенки ячейки установлены восемь индукционных датчиков уровня (ИДУ) (7). Цилиндрический медный катод (5) диаметром $d=30$ мм расположен на оси ячейки. Торец катода залужен и совмещен с дном. Верхняя часть боковой стенки служит анодом, питание которого осуществляется через медную трубку, коаксиально установленную снаружи катода. Этот коаксиальный токоподвод в значительной степени компенсирует собственное магнитное поле питающих кабелей. Источник питания обеспечивает постоянный ток до 800 А. Пара катушек Гельмгольца (6) создает постоянное вертикальное магнитное поле.

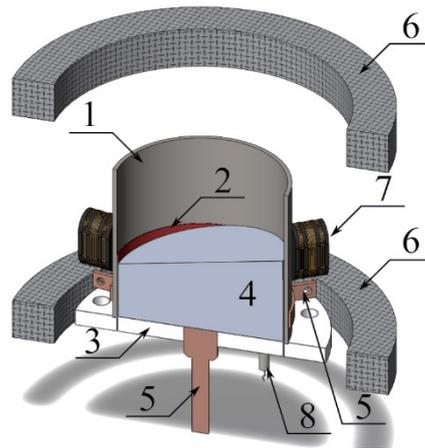


Рис. 1. - Схема экспериментальной установки: цилиндрическая ячейка из нержавеющей стали (1), изоляционное покрытие (2), дно из органического стекла (3), жидкий галлиевый сплав (с наклоненной поверхностью) (4), коаксиальные медные электроды (5), катушки Гельмгольца (6), индуктивный датчик уровня (7), датчик ультразвукового доплеровского анемометра (8)

В эксперименте в начальный момент времени поверхность жидкого металла испытывает внешнее механическое возмущение, в результате чего определенный объем жидкости контактирует с неизолированной частью бокового электрода, что заставляет электрический ток течь через ячейку. В результате взаимодействия этого тока с внешним вертикальным магнитным полем возникает азимутальная составляющая электромагнитной силы. При определенных условиях наряду с вращением жидкости внутри слоя возникает устойчивая круговая поверхностная волна.

Проведены измерения собственной частоты колебаний поверхности жидкого металла в ячейке. На основании полученных результатов определена зависимость характеристик КПВ от безразмерного силового параметра S . Показано, что как частота, так и амплитуда колебаний растут с ростом параметра по степенному закону (см. рис. 2а).

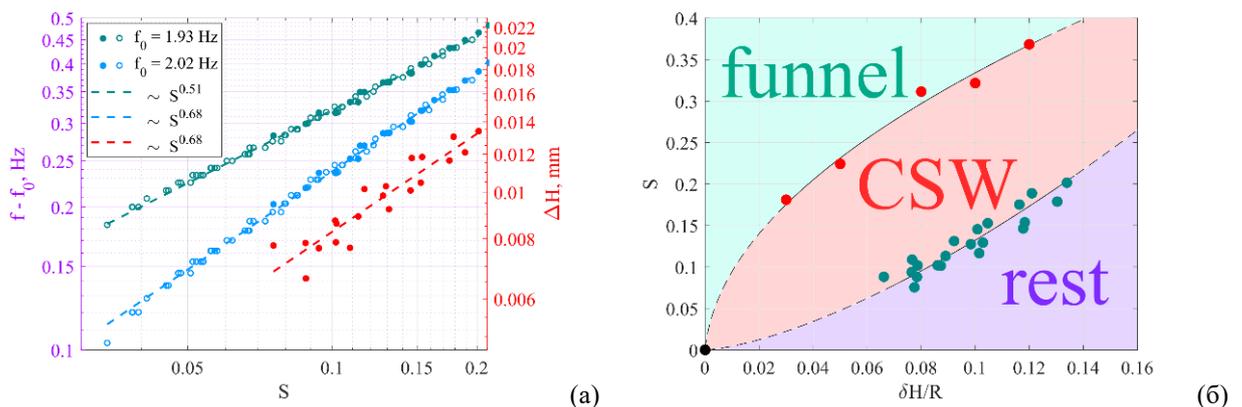


Рис. 2. - Сдвиг частоты $f - f_0$ и амплитуда волны ΔH в зависимости от силового параметра S в двойных логарифмических координатах (а); область существования режима КПВ на плоскости параметров силового параметра S и относительной высоты кольцевого электрода $\Delta H/R$ (б)

В зависимости от силового параметра и геометрических характеристик ячейки (радиуса ячейки, высоты слоя жидкого металла и положения кольцевого электрода) возможна реализация трёх режимов: покой, устойчивая КПВ или аксиальное вращение жидкого металла с глубокой воронкой на поверхности. На плоскости параметров

построена карта режимов, демонстрирующая границы области существования КВП (см. рис. 2б).

Предложен механизм, обеспечивающий существование устойчивой КВП. Показано, что КВП представляет собой суперпозицию двух крупномасштабных вихрей, интенсивность которых пропорциональна произведению величины внешнего магнитного поля на полный электрический ток, протекающий через ячейку (см. рис. 3). Это объясняет наблюдаемую в эксперименте линейную зависимость между относительной частотой поверхностных колебаний и их амплитудой.

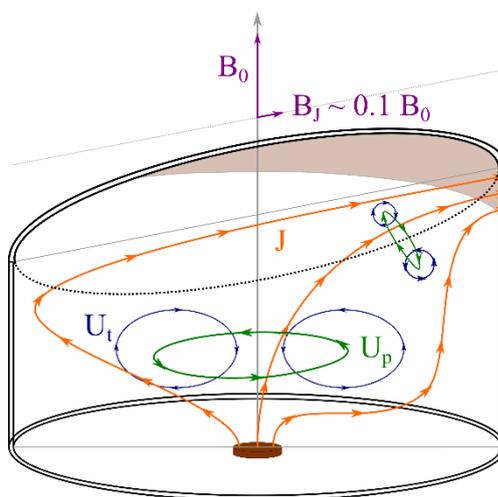


Рис. 3. - Схематическое изображение механизма поддержания КВП в МГД-ячейке

Представленные результаты могут иметь большую практическую значимость при разработке новых перспективных технологических устройств, таких как жидкометаллические накопители электроэнергии больших объемов, где, помимо гомогенизации жидкометаллических электродов, требуется контроль и обеспечение стабильности поверхностей жидких металлов [6].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.9.2.

Литература

1. Bojarevics V. Interfacial MHD waves and associated heat distribution due to dynamic electric current interaction In an aluminium electrolysis cell // *Magnetohydrodynamics*. 1992. Vol. 28, no. 4. P. 47–55.
2. Davidson P. A., Lindsay R. I. Stability of interfacial waves in aluminum reduction cells // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 362. P. 273–295.
3. Kim H., Boysen D. A., Newhouse J. M., Spatocco B. L., Chung B., Burke P. J., Bradwell D. J., Jiang K., Tomaszowska A. A., Wang K., Wei W., Ortiz L. A., Barriga S. A., Poizeau S. M., Sadoway D. R. Liquid metal batteries: Past, present, and future, *Chem. Rev.* 2012. Vol. 113. no. 3. P. 2075–2099.
4. Kelley D. H., Weier T. Fluid Mechanics of Liquid Metal Batteries // *Applied Mechanics Reviews*. 2018. Vol. 70, no. 2. P. 020801.
5. Eltishchev V., Losev G., Kolesnichenko I., Frick P. Circular surface wave in a cylindrical MHD cell // *Exp. Fluids*. 2022. Vol. 63, no. 8.
6. Eltishchev V., Losev G., Frick P. Maintenance mechanism of a circular surface wave in a magnetohydrodynamic cell and limits of its existence // *Physical Review Fluids*. 2024. Vol. 9, no. 8. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.083702>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ С Т-ОБРАЗНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В., Полюянов А.О.

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

Закрученные потоки широко распространены в природе и технологических процессах. В природе такие потоки встречаются в атмосферных циклонах, торнадо и тайфунах, а также в жидком ядре Земли (ответственны за генерацию магнитного поля планеты) [1]. В металлургии закрученные потоки встречаются, например, в центробежных насосах, участках трубопроводов за диверторами и в перемешивателях [2]. В частности, для нужд литейной промышленности хорошо зарекомендовали себя магнитогидродинамические (МГД) перемешиватели. В них интенсивные течения электропроводной среды создаются под воздействием бегущих либо вращающихся магнитных полей, или их сочетания. Такие аппараты применяются для улучшения качества металлов и их сплавов, а именно для получения большей степени гомогенизации при добавлении различных легирующих добавок, для повышения однородности кристаллической структуры, для уплощения фронта кристаллизации, а также для улучшения структуры металла вблизи границ и устранения усадочной впадины в центре слитка [3]. Зачастую на производстве не удается разместить индукторы МГД-перемешивателя вокруг всей ёмкости с жидким металлом, поэтому актуальна задача локального воздействия вращающегося магнитного поля и исследование области распространения закрученного потока [4].

С фундаментальной точки зрения интересна МГД-интерпретация задачи Куэтта-Тейлора, в которой роль вращающихся с разной скоростью цилиндров выполняют магнитные поля различной интенсивности, закручивающие проводящую среду с разной угловой скоростью и/или в различном направлении.

Для исследования вышеобозначенных задач в лаборатории технологической гидродинамики «ИМСС УрО РАН» была спроектирована и создана экспериментальная установка (рис. 1), состоящая из цилиндрической ячейки с Т-образным сечением (1) и двух индукторов вокруг цилиндров различного диаметра – малого (2) и большого (3). Диаметр нижнего цилиндра – 98 мм, верхнего – 212 мм, таким образом соотношение их диаметров примерно равняется двум. Высоты цилиндров одинаковы и составляют 150 мм. Каждый из индукторов содержит разборный секционный магнитопровод с катушками, надетыми на его зубья, направленные к главной оси цилиндрической ячейки. Причём число катушек (как и секций магнитопровода) в большом индукторе в два раза превышает количество катушек в малом. Это сделано для того, чтобы обеспечить одинаковую в обоих цилиндрах равномерность по азимуту электромагнитной силы, вращающей жидкий металл. Катушки каждого индуктора подключены по схеме вращающегося магнитного поля к трехфазным источникам тока (ЛАТРАм) независимо. Это позволяет создавать электромагнитные силы различной величины в двух цилиндрах, а также оперативно изменять направление вращения поля на противоположное.

Экспериментальная ячейка заполнена эвтектическим сплавом галлия $\text{Ga}_{86.3}\text{Zn}_{10.8}\text{Sn}_{2.9}$ (вес. %). Этот сплав очень удобен для подобных исследований, потому что является жидким при комнатной температуре, а также содержит в нормальном состоянии трассеры (частицы

оксидов), что позволяет измерять поля скорости ультразвуковым методом. Физические свойства среды при рабочей температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$: плотность $\rho = 6150\text{ кг/м}^3$, коэффициент объёмного теплового расширения $\beta = 9.63 \cdot 10^{-5}\text{ К}^{-1}$, кинематическая вязкость $\nu = 3 \cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с}$, электропроводность $\sigma = 2.6 \cdot 10^6\text{ См/м}$.

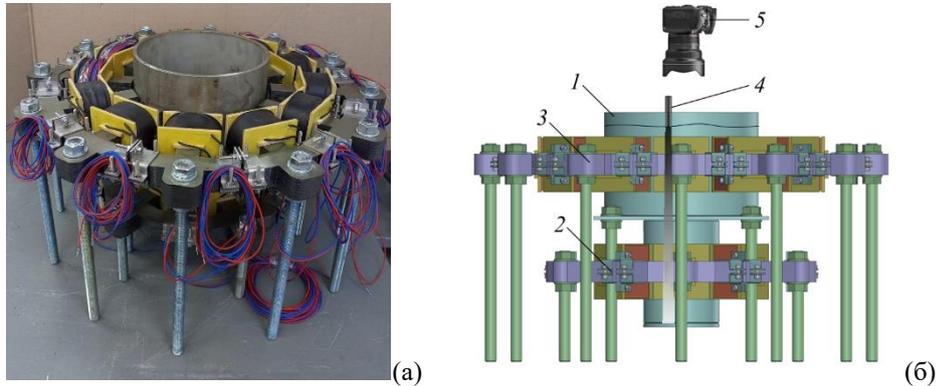


Рис. 1. - Фотография (а) и схема (б) экспериментальной установки: ячейка с Т-образным сечением (1), малый индуктор (2), большой индуктор (3), датчик Доплера (4), фотоаппарат (5)

Измерения проводились двумя методами. Во-первых, структура течения на поверхности фиксировалась посредством фотографирования фотоаппаратом (5). Для этого на поверхность жидкого металла наливалась смесь спирта и кислоты, в результате чего шло образование пузырьков. Анализируя снимки, полученные с определенной частотой, можно было получить картину среднего течения по пузырькам, а также значения поля скорости. Принимая, что трение жидкости о дно происходит по линейному закону Ньютона, можно восстановить структуру поля скорости в объёме верхнего цилиндра, основываясь на данных поля скорости на поверхности жидкости. Во-вторых, были получены вертикальные профили скорости с помощью ультразвукового датчика Доплера (как показано на рис.1б).

Рассматривались режимы с включенным одним нижним индуктором, а также с работающими нижним и верхним индукторами, включенными в режимах вращающегося магнитного поля как сонаправленно, так и в противоположных направлениях. Сила тока в индукторах также варьировалась независимо. Получены картины течений, возникающих в перечисленных режимах, а именно поля скорости на поверхности и вертикальные профили скорости в объёме жидкого металла. Показано, что в данной постановке задачи реализуются разнообразные течения закрученных потоков.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.9.3.

Литература

1. Д. Д. Соколов. Современное состояние и перспективы лабораторного динамо-эксперимента // Соросовский образовательный журнал. 2001. № 4. С. 111—115.
2. Вольдек А. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом // Энергия. Ленинград. 1970. 271 с.
3. Scepanskis M., Jakovich A., Nacke B. Homogenization of Non-Conductive particles in em induced metal flow in a cylindrical vessel // Magnetohydrodynamics. 2010. Vol. 46. p. 413-423.
4. Khalilov R.I., Mamykin A.D., Okatev R.S., Kolesnichenko I.V. The impact of flow induced by rotating magnetic fields on processes in a molten conductive medium // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2023. Iss. 3. P. 6–16. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.3.006-016.

Измерение характеристик закрученного течения с помощью ультразвукового доплеровского анемометра

Лосев¹ Г.Л., Ельтищев² В.А., Фрик³ П.Г.

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

Развитие технологий энергосбережения, в частности жидкометаллических батарей (ЖМБ), открывает новые области приложения МГД-технологий. Одним из таких аспектов является разработка средств интенсификации перемешивания жидких металлов посредством электровихревых течений (ЭВТ). ЖМБ представляет собой многофазную систему, включающую две фазы расплавленных металлов различной химической природы, разделенных слоем ионной жидкости (как правило, расплава электролита) [1, 2]. Именно текучесть жидких электродов обеспечивает долговечность использования ЖМБ в качестве хранилища электроэнергии за счёт разрушения контактной плёнки из продуктов химической реакции между электролитом и электродами в ходе перемешивания металла. С другой стороны, чрезмерное по интенсивности течение способно нарушить механическую целостность слоя ионной жидкости и привести к потере всего накопленного заряда.

Электровихревые течения – это вынужденные течения, возникающие в жидкой проводящей среде при протекании через неё электрического тока в присутствии внешнего магнитного поля или собственного магнитного поля тока. ЭВТ могут возникать в электродах ЖМБ в ходе процесса заряда и разряда энергохранилища за счёт протекания больших токов (вплоть до десятков килоампер) в присутствии магнитного поля земли.

Таким образом, важным вопросом разработки и эксплуатации ЖМБ является конфигурирование перемешивающих ЭВТ в жидких электродах для обеспечения желательного перемешивания материалов катода и анода ЖМБ и снижения риска нарушения целостности хранилища за счёт неконтролируемых течений.

Экспериментальное моделирование течений жидких металлов требует использования современных измерительных техник. Поскольку жидкие металлы оптически непрозрачны и обладают выраженными коррозионными свойствами, для измерения скорости потоков важно использовать бесконтактные методы измерений. Весьма удобным для неинвазивного измерения скорости методом является ультразвуковая доплеровская анемометрия (УДА) – измерение скорости потока за счёт эффекта Доплера (изменения частоты ультразвуковой волны, отраженной от движущегося объекта). Начало развития УДА приходится на девяностые годы [3] двадцатого века. К настоящему времени это надёжный и зарекомендовавший себя метод МГД-исследований [4, 5]. Современные ультразвуковые анемометры позволяют получать информацию не только о профиле скорости, но и наличии и положении межфазных границ, расширяя, таким образом, возможности анализа динамики многофазных сред (в частности многослойных МГД-систем).

Функционирование доплеровского анемометра основывается на корреляционном анализе изменения фазы между последовательно излученным и детектированным ультразвуковыми пакетами. В силу эффекта Доплера изменение фазы прямо пропорционально скорости течения в точке измерения. Положение этой точки вдоль линии распространения ультразвуковых пакетов определяется по времени пролёта волнового пакета и известной скорости звука в среде.

Определение положения границы раздела фаз при помощи ультразвукового анемометра производится на основе анализа профиля ультразвукового эха: в области

перехода между фазами происходит скачок акустического сопротивления среды, что вызывает множественные переотражения звуковых волн и существенное усиление уровня эхо в данной области. Таким образом, зная расстояние до точки локального максимума эхо-сигнала по времени пролёта ультразвукового волнового пакета, возможно восстановить положение границы раздела фаз вдоль ультразвукового луча.

Экспериментальные исследования скорости жидкой галлиевой эвтектики выполняются с помощью ультразвукового доплеровского анемометра. Для выполнения измерений с помощью ультразвукового доплеровского анемометра необходимо знать величину скорости звука в измеряемой жидкой среде. Это потребовало проведения дополнительного исследования, в ходе которого была измерена скорость звука для имеющейся галлиевой эвтектики в рабочем диапазоне температур.

Методика УДА была успешно применена к задаче изучения структуры перемешивающих ЭВТ в цилиндрической ячейке заполненной жидким металлом и деформируемой верхней границей. При определенных условиях, течение металла может приводить к генерации поверхностных волн, искривляющих границу раздела фаз. УДА позволило установить корреляцию между колебаниями подъёмно-опускного течения и изменением формы свободной поверхности жидкости.

Полученные данные важны при проектировке систем перемешивания жидких электродов и недопущения критичных для работы энергохранилища режимов колебаний границ раздела фаз.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.9.4.

Литература

1. Kim H, Boysen DA, Newhouse JM, Spatocco BL, Chung B, Burke PJ, et al. Liquid Metal Batteries: Past, Present, and Future // *Chem. Rev.* 2012. Vol. 113. P.2075–2099. <https://doi.org/10.1021/cr300205k>
2. Kelley DH, Weier T. Fluid Mechanics of Liquid Metal Batteries // *Applied Mechanics Reviews.* 2018. Vol. 70. <https://doi.org/10.1115/1.4038699>
3. Takeda Y. Velocity profile measurement by ultrasonic Doppler method // *Experimental Thermal and Fluid Science.* 1995. Vol. 10. P. 444–453. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(94\)00124-Q](https://doi.org/10.1016/0894-1777(94)00124-Q)
4. Wang X, Fautrelle Y, Etay J, Moreau R. A Periodically Reversed Flow Driven by a Modulated Traveling Magnetic Field: Part I. Experiments with GaInSn // *Metall Mater Trans B.* 2008. Vol. 40. P. 82–90. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9176-0>
5. Horstmann GM, Wylega M, Weier T. Measurement of interfacial wave dynamics in orbitally shaken cylindrical containers using ultrasound pulse-echo techniques // *Experiments in Fluids.* 2018. Vol. 60. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.11768>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ СРЕД

Колесниченко И.В., Окатьев Р.С., Шестаков А.В., Халилов Р.И., Мамыкин А.Д.

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

Генерация закрученных течений жидкого металла с помощью бесконтактного воздействия вращающимися магнитными полями давно используется в литейных технологиях [1]. При этом, только вращающийся металл создает слабо развитое полоидальное течение, которое можно усилить добавлением бегущего магнитного поля [2]. Для генерации течений с наиболее развитыми полоидальной и тороидальной компонентами скорости лучше всего подходит индуктор с чередующимися по вертикали направлениями вращающегося магнитного поля [3]. Это решение открывает большие возможности для перемешивания при литье. Оказывается, такое перемешивание также необходимо в развиваемых жидкометаллических накопителях энергии с локализованным подводом тока из-за того, что существует интервал значений внешнего магнитного поля, при воздействии которого интенсивность полоидального перемешивающего течения существенно снижается [4,5]. В данном случае решением проблемы может быть дополнительный канал с надетым на него индуктором вращающегося поля, генерирующим азимутальную силу f_1 (рис. 1а). Целью работы является численное исследование течений, созданных противоположно направленными силами f_1 и f_2 , генерируемыми вращающимися магнитными полями.

Математическая модель процессов основана на уравнениях магнитной гидродинамики в изотермическом случае и электродинамическом приближении, которое можно применять вследствие малости значений числа Гартмана и магнитного числа Рейнольдса. Это позволяет решать задачу электродинамики и гидродинамики отдельно. Задача электродинамики формулируется на основе уравнений Максвелла, закона Ома и линейной связи индукции и напряженности магнитного поля. Задача гидродинамики формулируется на основе уравнения Навье-Стокса и неразрывности с применением полуэмпирической ка-омега модели турбулентности. На границе расчетной области ставятся условия отсутствия нормальных компонент для магнитного поля. На границе области с жидким металлом ставится условие отсутствия нормальных компонент вектора плотности тока и прилипания для скорости.

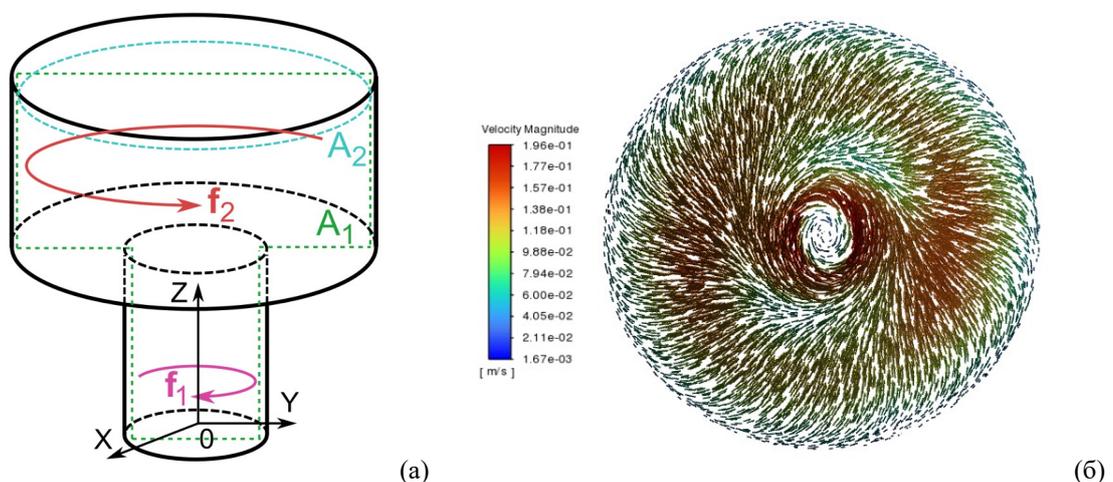


Рис. 1. - схема расчетной области (а); поле вектора скорости в проекции на плоскость A_2 (б)

Численная реализация математической модели выполнена в программной среде Ansys. В ходе многовариантных расчетов получены поля скорости и давления для различных соотношений силовых параметров, характеризующих интенсивность электромагнитных сил, созданных вращающимися полями. На рисунках 1б и 2а в качестве примера показаны сечения поля скорости для случая воздействия вращающимися магнитными полями в разных направлениях, при этом интенсивность силы f_1 на порядок выше, чем у f_2 . На рисунке 1б показано векторное поле скорости в проекции на плоскость сечения A_2 . Видно формирование центрального торнадо-подобного вихря, обусловленного раскруткой потока нижним индуктором. Тем не менее, на рисунке 2а видно, что вращающийся вихрь, генерируемый верхним индуктором, также существует, и при этом он не подавлен нижним вихрем. Рисунок 2б показывает развитие интенсивных полоидальных течений в нижней и верхней областях ячейки.

Описанная конфигурация, которая создает интенсивные закрученные потоки, способна существенно увеличить степень гомогенизации состава жидкого анода и катода жидкометаллического накопителя электроэнергии больших объемов. Эта конфигурация содержит дополнительный канал с индуктором вращающегося поля, адаптивное управление которым осуществляется источником питания с частотным управлением.

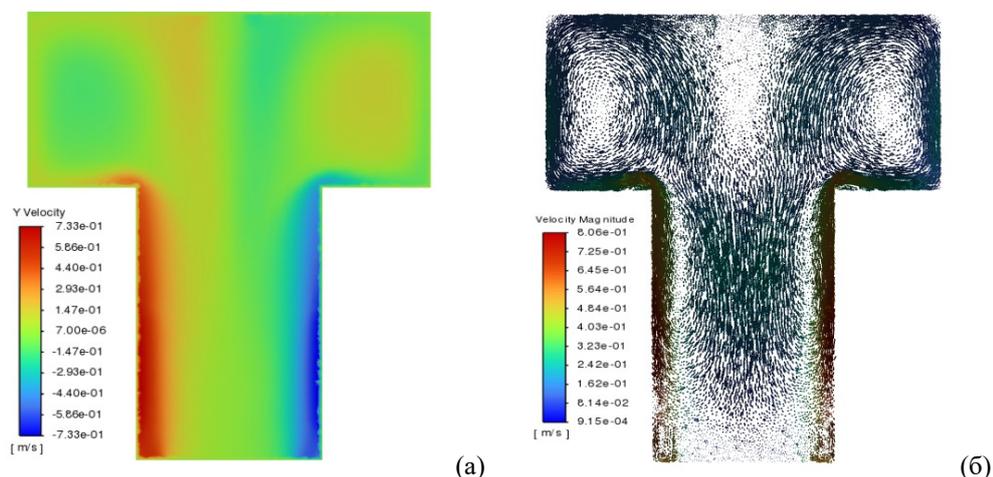


Рис. 2. - поле V_y компоненты скорости на плоскости A_1 (а); поле вектора скорости в проекции на A_1 (б)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.9.5.

Литература

1. Moffatt H.K. Electromagnetic stirring // Phys. Fluids A Fluid Dyn. 1991. Vol. 3. P. 1336–1343. <https://doi.org/10.1063/1.858062>
2. Stiller J., Koal K., Nagel W.E., Pal J., Cramer A. Liquid metal flows driven by rotating and traveling magnetic fields // Eur. Phys. J. Spec. Top. 2013. Vol. 220, P. 111–122. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01801-8>
3. Kolesnichenko I., Okatev R. Equalisation the toroidal and poloidal kinetic energies of liquid metal stirring flow // Eur. Phys. J. Plus. 2024. Vol. 139, P. 846. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05629-7>
4. Kolesnichenko I., Frick P., Eltishchev V., Mandrykin S., Stefani F. Evolution of a strong electrovortex flow in a closed cell // Phys. Rev. Fluid. 2020. P. 123703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.123703>
5. Frick P., Mandrykin S., Eltischev V., Kolesnichenko I. Electro-vortex flows in a cylindrical cell under axial magnetic field. // J. Fluid Mech. 2022. Vol. 949. P. 20. <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.746>

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КИНЕТИКИ АБСОРБЦИИ И МАССОПЕРЕДАЧИ ГАЗОВОЙ ПРИМЕСИ ВОЗДУХА К СОРБИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Суханов А.Е.¹, Мальцев С.В.¹, Стариков А.Н.¹, Семин М.А.¹, Кузнецова Ю.Л.²

¹«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

²«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

В процессе добычи калийной руды протекает множество технологических процессов, которые сопровождаются выделением различных вредных газов, таких как окислы азота и углерода, а также горючие газы, включая метан. Вместе с этим, проведенные ранее исследования газовой обстановки в выработках калийных рудников Верхнекамского месторождения показывают, что концентрации горючих газов в проходческих забоях значительно выше, чем в выработках главных направлений. Требуется изучение причин этого явления.

Ранее было отмечено, что среднесуточное содержание вредных газов в рудничном воздухе ниже, чем на поверхности, что связано с поглощением газов калийными солями. Механизм сорбции объясняется конвективно-диффузионным массопереносом и массопередачей газов к сорбирующим поверхностям. Также предполагается, что естественная бета-радиоактивность калийных руд способствует образованию ионов, что усиливает ионизацию газов и горных пород [1].

Другие исследования анализировали зависимость газов от расстояния до воздухоподающего ствола и выявили, что при приближении к стволу увеличивается концентрация углеводородов и CO_2 , что свидетельствует о поглощении этих газов [2]. Хемосорбционные процессы были изучены в экспериментах [3, 4], сравнивающих сильвинитовые помещения с контрольными. Результаты показали, что сильвинит эффективно поглощает углекислый газ и углеводороды, благодаря своей структуре и ионизирующему излучению. Предыдущие исследования также выявили процесс самоочищения воздуха в шахтах, где концентрация загрязняющих веществ снижается с удалением от воздухоподающего ствола [5].

Тем не менее, количественные характеристики поглощения газов калийным массивом остаются недостаточно изученными. В настоящей работе проведено экспериментально-теоретическое исследование поглощения оксида углерода и метана солью различных минеральных составов.

В ходе исследования было проведено несколько лабораторных экспериментов, которые подтвердили, что поваренная соль и сильвинит способны поглощать угарный газ (CO) и метан (CH_4). Средний процент сорбции сильвинитом ($\text{KCl} + \text{NaCl}$) для метана составил 18%, а для угарного газа — 40,8%. При использовании поваренной соли (NaCl) средний процент сорбции для метана составил 14,5%, а для угарного газа — 81,8%. Результаты поглощения противоречат теориям, связывающим интенсивность сорбции с естественной радиоактивностью калийного массива. Авторы работы пришли к выводу, что ключевым фактором, влияющим на поглощение газов, являются силы Ван-дер-Ваальса. Полученные результаты требуют подтверждения в условиях подземного рудника и более детального изучения.

Также были проведены наблюдения на одном из калийных рудников Верхнекамского месторождения с целью оценки влияния сорбционных свойств калийных солей на газовую обстановку в длинных тупиковых горных выработках (более 100

метров). В рамках работы выполнены эксперименты в зонах, связанных с продуктивными пластами Кр-II и АБ. Результаты показали, что в протяженных тупиковых камерах количество газовых примесей уменьшается от тупика к устью. Эти наблюдения подтверждают данные лабораторных экспериментов, где было установлено, что калийная соль способна поглощать угарный газ (СО) и горючие газы ($H_2 + CH_4$).

Кроме того, в работе также проведены эксперименты на продуктивном пласту АБ, где наблюдается снижение выделяемого сероводорода (H_2S) от забоя до устья камеры. При проведении исследований были учтены все факторы, способные влиять на концентрацию газов в рабочей зоне. Утечки из вентиляционного трубопровода, разжижающие струю свежим воздухом, также были учтены при определении объема газа, проходящего через выработку.

Проведенные экспериментальные данные позволили сформулировать и параметризовать математическую модель поглощения газовых примесей, присутствующих в атмосфере рабочих зон калийных рудников, в результате их взаимодействия с породным массивом. На математической модели проведен анализ закономерностей изменения концентрации газовых примесей в окрестности соляного массива при различных значениях влажности, температуры воздуха и концентрации углекислого газа в нем. В качестве основы для математической модели принята ранее разработанная модель [6], описывающая эволюцию размера отдельной аэрозольной частицы при различных микроклиматических параметрах окружающей ее воздушной среды. Для учета абсорбции газа из воздуха модель модифицирована на предмет включения уравнения изменения количества вредного газа, абсорбированного частицей.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.10.1.

Литература

1. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. Свердловск: АН СССР, 1990. 250 с.
2. Красноштейн, А.Е. Физико-химический механизм в процессе адсорбции ядовитых примесей рудничной атмосферы калийными солями // Пермский политехнический ин-т. Пермь, 1977.
3. Селиванова С.А., Кириченко Л.В., Баранников В.Г. Гигиенические исследования сорбционных свойств минерала сильвинита в сооружениях из природных калийных солей. Пермь: ПГМУ им. академика Е. А. Вагнера Минздрава России, 2019.
4. Селиванова С.А. Гигиенические особенности формирования и оптимизация физико-химических условий внутренней среды сильвинито-вых сооружений. Пермь: Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера, 2019.
5. Origin, distribution, and perspective health benefits of particulate matter in the air of underground salt mine: A case study from Bochnia, Poland / A. Pulawska [et al.] //Environmental Geochemistry and Health. 2021. Т. 43. №. 9. С. 3533-3556.
6. Кузнецова Ю.Л. Эволюция размера растворимой аэрозольной частицы во влажном воздухе // Вычислительная механика сплошных сред 15.1 (2022), с. 31-44.

МОДЕЛЬ СОРБЦИИ ГАЗА ВОДОРАСТВОРИМЫМИ АЭРОЗОЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Коновалов В.В., Кузнецова Ю.Л.

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

Разработка калийных месторождений в большинстве случаев сопровождается выделением в рудничную атмосферу вредных газов, таких как углекислый газ CO_2 и метан CH_4 . Экспериментальные исследования концентрации вредных газовых примесей по длине выработки показали, что наблюдается снижение содержания данных компонент в воздухе от забоя, источника их появления, до устья камеры. Предполагается, что снижение концентрации связано со способностью природных калийных солей поглощать газообразные ядовитые примеси [1]. Однако в настоящий момент нет четкого понимания механизма сорбции для калийных солей. В частности, в работе [2] представлены научные обоснования сорбции газов калийным массивом, а также проведен ряд натурных и лабораторных исследований, на основании которых сделано предположение о ключевом влиянии сил Ван-дер-Ваальса на поглощение газов калийных шахтах.

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

Характерной особенностью соленых пород является их гигроскопичность, т. е. способность адсорбировать из воздуха молекулы воды, а также растворяться при превышении влажности воздуха критического значения (DRH). Вода, в свою очередь, при нормальных условиях обладает способностью хорошо растворять некоторые вредные газы, в частности, углекислый газ. Поэтому, поскольку процесс добычи калийной соли сопровождается формированием в забое мелкодисперсной гигроскопической пыли с большой поверхностью контакта, механизм сорбции газов водой или раствором, покрывающей частицы, может приводить к заметному изменению концентрации вредных газов по длине выработки.

В настоящей работе проведено моделирование роста гигроскопической аэрозольной частицы с учетом сорбции углекислого газа при различных значениях влажности (RH), температуры (θ) и концентрации углекислого газа (ρ) окружающего воздуха. За основу для создания математической модели используется модель, предложенная в работе [3]. Данная модель была построена для описания эволюции размера изолированной аэрозольной частицы при различных значениях влажности и температуры воздуха, но не учитывала абсорбцию газа из воздуха. Для учета этого процесса в модель было добавлено уравнение для изменения количества вредного газа абсорбированного частицей вида [4]:

$$p_{g,*} = K_g \frac{M_g n_w}{(M_w n_w + M_c n_{c,d} + M_g n_g)} \quad , \quad , \quad .$$

$K_{g,*}$ M_w , M_c

Здесь -- радиус частицы, -- молярные массы газа, воды и соли, -- парциальное давление растворяемого газа над поверхностью частицы, -- температура частицы, , -- коэффициенты диффузии и растворимости газа, зависящие от температуры частицы. Данное соотношение предполагает, что изменение концентрации вредной примеси в

$$T_{\infty} = 293$$

частице происходит за счет диффузии молекул вызванной неоднородностью их концентрации на поверхности раздела фаз и вдали от нее, при этом концентрация раствора над поверхностью изменяется пропорциональной мольной доле растворенного газа. Решение модифицированной модели проводилось численно, методом последовательного вычисления дифференциальных уравнений методом Эйлера для количества молекул воды, растворенного газа, молекул растворенной соли и температуры частицы. Результаты расчетов концентрации абсорбированного газа для частицы радиусом 3 мкм при температуре К, концентрации вредного газа $C_{g,\infty} = 0.1$ моль/м³ и различной относительной влажности окружающего воздуха представлен на рисунке 1.

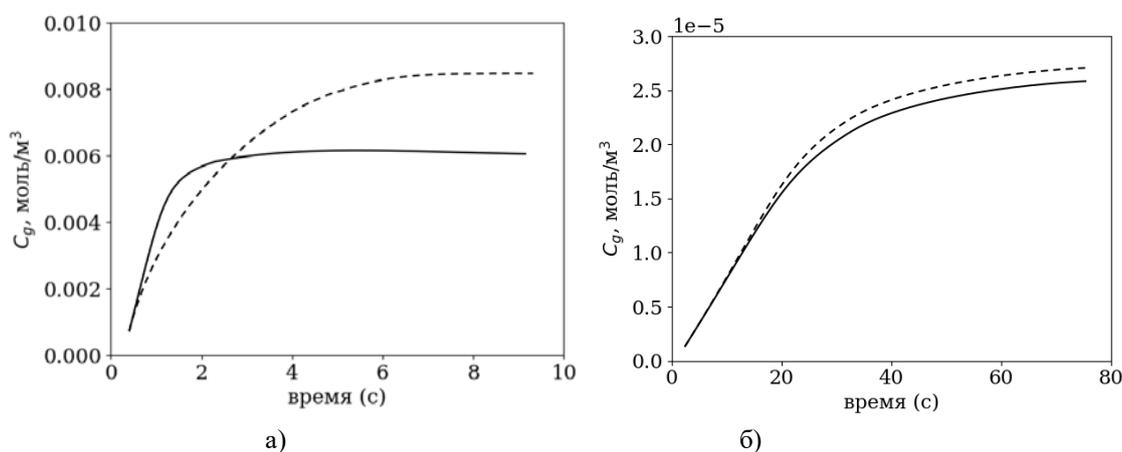


Рис. 1. Изменение концентрации растворенного газа в частице. а) – для углекислого газа, б) – для метана. Сплошные линии RH=40%, штриховая RH = 75%

Согласно полученным данным для влажности воздуха RH=40% (ниже критического значения DRH \approx 75%), растворение газа происходит в полимолекулярном слое адсорбированной воды, при этом скорость растворения газа значительно ниже скорости образования слоя адсорбции воды. При RH = 80% частица растворяется и образуется капля раствора соли. Это приводит к снижению скорости растворения газа, но за счет большего количества абсорбированной частицей воды концентрация растворенного углекислого газа увеличивается. Растворимость метана в слое воды и капле раствора значительно ниже соответствующих показателей для углекислого газа. Результаты модели качественно согласуются с известными данными о растворении исследуемых газов.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.10.2.

Литература

1. Медведев И.И., Полянина Г.Д. Газовыделения на калийных рудниках. М., «Недра», 1974, стр.168
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, 495-507
3. Кузнецова Ю.Л. Эволюция размера растворимой аэрозольной частицы во влажном воздухе // Вычислительная механика сплошных сред 15.1 (2022), с. 31—44.
4. Рамм В.М. Абсорбция газов. М., «Химия», 1976, стр.656

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПО ДАНЫМ СЕРИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТКАХ

Семина М.А.¹, Любимова Т.П.², Иванцов А.О.², Исаевич А.Г.¹, Суханов А.Е.¹,
Файнбург Г.З.¹, Таций А.В.¹, Левин Л.Ю.¹, Накаряков Е.В.¹

¹«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

²«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Производительная и безопасная проходка тупиковых горных выработок является обязательным начальным этапом подземной добычи полезных ископаемых. Важнейшим этапом проходческого цикла является проветривание, технические средства которого превращают тупиковую полость (глухой забой) в элемент сквозного аэродинамического проветривания сети горных выработок.

Среди различных способов проветривания тупиковых выработок наибольшее распространение получил нагнетательный способ [1]. Основным достоинством этого способа проветривания для буровзрывного способа проходки является высокоскоростная струя свежего воздуха, обеспечивающая эффективное перемешивание и вынос загрязнённого воздуха из фронтальной зоны, прилегающей к груди забоя. Такое проветривание особенно необходимо по двум причинам. Во-первых, в результате взрыва образуется большое количество токсичных отпалочных газов в смертельно опасных концентрациях, а во-вторых, происходит быстрое интенсивное газовыделение горючих газов со свежееобнажённых поверхностей горного массива и отбитой руды во взрывоопасных (и более) концентрациях. В первые мгновения после взрыва все эти газы полностью заполняют пространство призабойной зоны, и поэтому они должны быть удалены из неё, что наиболее сложно сделать во фронтальной зоне, для которой только струя воздуха, проникающая в эту зону и омывающая грудь забоя, наиболее эффективна как средство проветривания.

В рамках настоящего исследования была изучена структура воздушных потоков в тупиковой выработке, проветриваемой нагнетательным способом. На основании данных экспериментальных измерений параметров воздушного потока в тупиковой выработке сформулирована и параметризована математическая модель, описывающая аэрологические процессы в тупиковой выработке. Для детального анализа нами были предложены три показателя, комплексно характеризующие структуру потока в выработке: (1) продольная максимальная скорость в определённом сечении выработки, (2) поперечная средняя скорость в определённом сечении выработки и (3) прямой поток воздуха, проходящий через определённое сечение в сторону тупикового забоя. Численное моделирование стационарной трёхмерной вихревой структуры воздушных потоков в зоне тупикового забоя проводилось в широком диапазоне расстояний между концом вентиляционного трубопровода и тупиковым забоем (от 10 м до 50 м) и широком диапазоне скоростей воздушной струи, выходящей из вентиляционного трубопровода. На основании результатов моделирования установлено, что эффективность проветривания фронтальной призабойной зоны (1 м от тупикового забоя) линейно снижается с увеличением расстояния между концом вентиляционного трубопровода и тупиковым забоем. Показано, что это увеличение расстояния всегда можно компенсировать за счёт

увеличения скорости воздушной струи, выходящей из трубопровода. Этот вывод крайне важен для практики проветривания тупиковых выработок, так как открывает перспективы обоснования безопасности проветривания с вентиляционными трубопроводами, расположенными на существенном удалении от забоя [2].

Если при буровзрывной технологии ведения горных работ нагнетательный способ является наиболее эффективным, то при комбайновой проходке горных выработок на калийных рудниках эффективность данного способа существенно снижается из-за большого количества соляной пыли, попадающей в атмосферу тупиковых выработок при разрушении породного массива и перегрузке руды с комбайна на бункер-перегрузатель и самоходный вагон. Ранее было показано, что при минимизации концентрации пыли вблизи кабины машиниста комбайна перспективным является всасывающий способ проветривания. Основным преимуществом всасывающего способа является то, что он обеспечивает преимущественно адвективный перенос массы от устья выработки к груди забоя, препятствуя распространению пассивной пылевой примеси по всему объёму выработки, как это имеет место для нагнетательного способа, формирующего в призабойной зоне крупномасштабный циркулирующий вихрь.

Однако в случае, если при разрушении породного массива комбайном помимо пыли выделяется также газ, применение всасывающего способа требует дополнительного научного обоснования. Всасывающий способ создаёт менее интенсивный поток воздуха в выработке, что потенциально может увеличить локальные значения концентрации выделяемых газов у тупикового забоя. Поэтому в настоящей работе проведён анализ динамики метана в тупиковой выработке с работающим проходческим комбайном [3].

Сформулирована численная модель переноса метановоздушной смеси в тупиковой выработке с учётом влияния тепла работающего проходческого комбайна. Параметризация модели выполнена с использованием данных полевых исследований на калийном руднике. Численное моделирование позволило определить закономерности распределения облака метана вблизи кровли выработки при различных параметрах вентиляционной системы и тупиковой выработки. Результаты моделирования выявили существенное влияние выделяемого проходческим комбайном тепла на распределение поля скоростей и концентрации метановоздушной смеси в выработке.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.10.3.

Литература

1. Toraño J., Torno S., Menéndez M., Gent M. Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: Validated CFD modelling of dust behaviour // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2011. – Т. 26. – №. 1. – С. 201-210.
2. Semin M., Faynburg G., Tatsiy A., Levin L., Nakariakov E. Insights into turbulent airflow structures in blind headings under different ventilation duct distances // *Scientific Reports*. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 23768.
3. Semin M., Ivantsov A., Lyubimova T., Isaevich A., Sukhanov A. Analyzing the impact of heat emissions from the borer miner on the efficiency of the exhaust ventilation system in a blind heading // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Т. 235. – Статья № 126183.

ПРОВЕДЕНИЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИИ ДОБЫЧНОЙ ПАНЕЛИ С ВЕНТИЛЯТОРАМИ-ЭЖЕКТОРАМИ, ПОСТРОЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Бублик С.А., Мальцев С.В., Козунин И.И., Семин М.А.

«Горный институт УрО РАН» - филиал ФИЦ УрО РАН

Основной задачей любой системы подземной вентиляции является обеспечение всех рабочих зон (или потребителей) воздухом в достаточном количестве и качества для разбавления загрязняющих веществ до безопасных концентраций. Вентиляционная сеть шахты ООО «Кнауф Гипс Новомосковск» характеризуется большими сечениями выработок, сильной разветвленностью и значительной протяженностью. Эти особенности усложняют процесс доставки свежего воздуха до конечных потребителей, что, в свою очередь, затрудняет выполнение основной задачи системы вентиляции.

Проветривание горных выработок шахты осуществляется нагнетательным способом с помощью главной вентиляторной установки, расположенной на клетевом стволе. Свежий воздух подается через калориферный канал по клетевому стволу в шахту и распределяется по выработкам околоствольного двора, камерам служебного назначения и нескольким крупным панелям, которые являются основными потребителями воздуха. Шахтные панели представляют собой «густую сеть» горных выработок (см. рисунок 1).



Рис. 1. Геометрическая модель одной из добычных панелей шахты, разработанная в программном комплексе Ansys

Перспективным решением для обеспечения всех выработок добычных панелей шахты требуемым количеством воздуха является использование вентиляторных установок местного проветривания (ВУМП-6, ВУМП-8), установленных вдоль основного воздушного тракта и работающих без перемычки. Такие установки также называют эжекторными. За счет кинетической энергии струи, исходящей из вентилятора,

происходит эжекция воздушного потока, увеличивается средняя скорость движения воздуха по выработке, а также, после выравнивания потока по поперечному сечению, увеличивается его статическое давление.

Существует два подхода к моделированию воздухораспределения в системах горных выработок, проветриваемых вентиляторами-эжекторами. Первый подход заключается в построении эквивалентной напорной характеристики вентилятора-эжектора как некоторого виртуального вентилятора, который занимает все поперечные сечения горной выработки и создает определенный напор, аналитически выражаемый через реальную разницу давлений на входном и выходном сечениях вентилятора-эжектора. Этот подход важен для математического описания вентиляторов-эжекторов (и всей вентиляционной сети в целом) в рамках одномерного подхода с помощью уравнений, отражающих законы Кирхгофа 1-го и 2-го рода. Данный вопрос исследовался ранее в трудах [3, 4].

Однако было показано, что существующие аналитические модели, описывающие вентилятор-эжектор как эффективный вентилятор с эффективным напором, работают только для выработок с относительно небольшим поперечным сечением, в то время как площадь сечения выработок добычных панелей рассматриваемой гипсовой шахты достигает 132 м².

Еще одним недостатком аналитического подхода является гипотеза, согласно которой воздушная струя, исходящая из эжектора, успевает полностью раскрыться в тупиковой выработке. Экспериментальные данные, полученные нами при обследовании гипсовой шахты, указывают на то, что в условиях большого количества сбоев на добычной панели (см. рисунок 1) воздушные струи, исходящие из вентиляторов-эжекторов, не успевают раскрыться.

Поэтому в последнее десятилетие для решения подобных вентиляционных задач применяется второй подход, основанный на трехмерном численном моделировании вентиляционных процессов в разветвленных системах горных выработок. Именно этот подход использован в настоящей работе при анализе закономерностей проветривания и выноса вредных примесей из выработок добычной панели гипсовой шахты (см. рисунок 2).

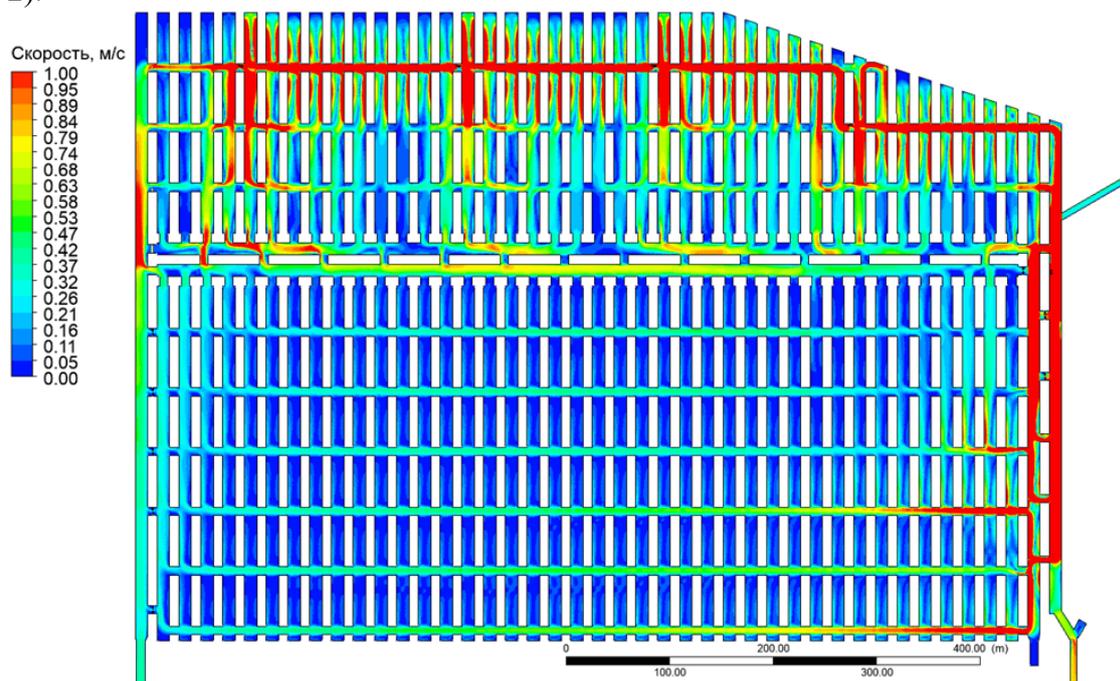


Рис. 2. Модельное поле скорости воздуха во всей панели

В рамках данной работы разработана трехмерная аэродинамическая модель горных выработок в пределах добычной панели, учитывающая фактические геометрические параметры выработок, влияние эжекторных установок и нестационарный перенос вредных примесей, выделяющихся при ведении горных работ. Проведена серия расчетов нестационарного газораспределения в системе выработок панели, включающая различные варианты задания расхода воздуха на транспортном штреке панели, длины тупиковой камеры, типа вентиляторных установок и размещения камеры, в которой проводятся взрывные работы (по степени удаленности от вентилятора-эжектора — первая, вторая и третья камера). Также рассмотрены различные технологические мероприятия, направленные на интенсификацию воздухообмена в выработках панели, такие как наличие и отсутствие скосов на углах сопряжений камер с транспортным штреком и наличие направляющих на этих углах.

В результате применения комплекса современных интеллектуальных методов моделирования были определены аппроксимирующие зависимости времени проветривания тупиковых выработок после проведения буровзрывных работ от параметров системы вентиляции и параметров буровзрывных работ. Показано, что при текущих параметрах системы вентиляции (эжекторная установка проветривает три камеры) время проветривания составляет 5-8 часов в зависимости от подаваемого на панель расхода воздуха. При этом за 2 часа проветривается только ближайшая к вентилятору-эжектору камера.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.10.4.

Литература

1. Семин М.А., Мальцев С.В., Родионов В.А. Совершенствование методов расчета эквивалентного напора эжекторных установок в горных выработках большого сечения// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 7. С. 185–195.
2. Казаков Б.П., Семин М.А. Мальцев С.В. Математическое моделирование проветривания панелей гипсовой шахты эжекторными установками // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2018. № 3. С.237–247.
3. Шалимов А.В. Исследование влияния эжекторных установок на воздухораспределение в рудничных вентиляционных сетях произвольной топологии: дисс. ... канд. техн. наук. Пермь, 2003. 142 с.
4. Медведев И.И. Проветривание калийных рудников. М.: Недра, 1970. 208 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ФОРМУЛИРОВКА ПРИНЦИПОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ ДОБЫЧНОЙ ПАНЕЛИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ- ЭЖЕКТОРАМИ

Козунин И.И., Мальцев С.В., Семин М.А., Левин Л.Ю.

«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

В последние десятилетия в горнодобывающей промышленности России и за рубежом наблюдается тенденция к увеличению мощностей добычи полезных ископаемых. При этом истощение легкодоступных ресурсов ведет к углублению горных работ и расширению шахтных полей [1]. В таких условиях вентиляционные сети становятся более разветвленными и протяженными, с постоянно изменяющейся топологией, что связано с появлением новых выработок и выводом существующих из эксплуатации. Оптимизация параметров проветривания становится ключевым аспектом, непосредственно влияющим на безопасность и здоровье работников, а также на эффективность добычи.

Объектом данного исследования является одна из гипсовых шахт Российской Федерации, отличающаяся большими сечениями выработок и высокой степенью разветвленности. Мы применили ранее разработанную трехмерную математическую модель для проведения многопараметрического численного моделирования, анализируя влияние различных параметров системы вентиляции и технологии ведения горных работ на скорость проветривания одной из панелей после буровзрывных работ.

Результаты исследования показали, что при отсутствии вентиляторов большая часть панели остается непроветриваемой даже через 8 часов. Ни одна из тупиковых выработок (или камер), где проводились взрывные работы, не получает достаточного воздуха за это время. В случае работы 8 вентиляторов панель полностью проветривается, за исключением призабойного пространства одной камеры, которая находится на одной линии с вентиляционно-конвейерным кроссингом. При использовании 4 вентиляторов большая часть панели остается непроветриваемой, и в 5 из 8 камер превышение уровня газа сохраняется.

Мы провели серию расчетов нестационарного газораспределения в системе выработок, учитывающую: три варианта расхода воздуха на транспортном штреке (1300, 2000 и 3000 м³/мин), три варианта эффективной длины зоны отброса газов (40, 50 и 60 м), три варианта размещения камер с взрывными работами (первая, вторая и третья камеры по удаленности от вентилятора-эжектора), три варианта длины тупиковой камеры (50, 60 и 70 м) и два типа вентиляторных установок (ВУМП-6 и ВМ-8).

Анализ показал, что время проветривания тупиковых выработок после буровзрывных работ зависит от параметров системы вентиляции и буровзрывных работ. При текущих параметрах (эжекторная установка проветривает три камеры) время проветривания составляет 5-8 часов в зависимости от расхода воздуха на панель. За 2 часа проветривается только ближайшая к вентилятору-эжектору камера.

Снижение длины камеры на 10 м приводит к уменьшению времени проветривания всего на 25 минут. При проектных параметрах вентиляции вторая камера с длиной 60 м проветривается за 3,1 часа, а при длине 50 м — за 2,8 часа (см. рисунок 1).

На основе полученных результатов сформулированы основные рекомендации для шахты:

1. Уменьшение длины тупикового забоя на 10 м влияет на время проветривания панели незначительно — всего на 25 минут. Оптимизировать систему вентиляции по этому параметру нецелесообразно.
2. Применение более мощного вентилятора ВМ-8 в эжекторных установках с камерами смешения на транспортном штреке позволит сократить общее время проветривания панели на 25-30% при неизменных параметрах системы. При обеспечении расхода воздуха 2400 м³/мин за 2 часа будут проветриваться две камеры, а для трех камер с вентилятором ВМ-8 потребуется 5,7 часов.

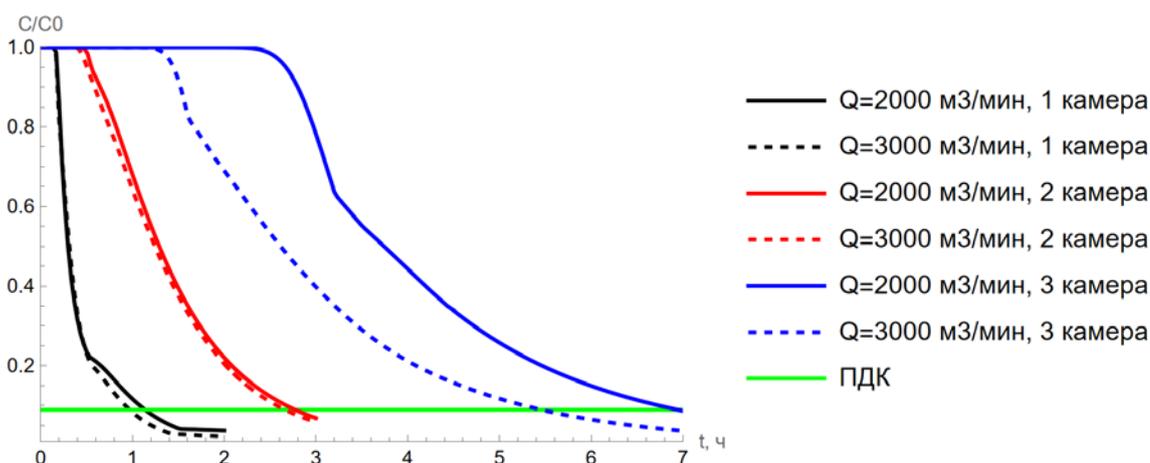


Рис. 1. Численно рассчитанные временные зависимости снижения максимальной безразмерной концентрации газа на панели при различных расходах, подаваемых в камеру, а также при различных камерах, в которых происходит детонация взрывчатого вещества

По итогам проведенного исследования были сформулированы основные принципы проветривания добычной панели с использованием вентиляторов-эжекторов. Выделены четыре ключевых воздушных зоны в добычной панели: активные и пассивные тупиковые выработки, главный воздушный тракт и выработанное пространство. Активные тупиковые выработки — это те, в которых происходит детонация взрывчатых веществ, в то время как пассивные — это выработки, где изначально не образуются вредные примеси. Главный воздушный тракт отвечает за доставку, перенос и отведение основного объема воздуха, поступающего для проветривания панели.

Процесс проветривания панели, а именно вынос вредных примесей из призабойного пространства тупиковых выработок, можно представить как аэродинамическое взаимодействие этих трех воздушных зон. В этой связи система вентиляции добычной панели должна быть организована таким образом, чтобы максимизировать интенсивность воздухообмена между активными выработками и главным воздушным трактом. В то же время воздухообмен между главным воздушным трактом и пассивными тупиковыми выработками, а также выработанным пространством должен быть минимизирован. Это поможет исключить занесение и накопление вредных примесей в этих зонах в процессе проветривания панели после взрывных работ.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.10.5.

Литература

1. Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Аэрология горных предприятий: история, современное состояние и перспективные направления // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2018. № 1. С. 58-66.

УСТОЙЧИВОСТЬ КВАЗИРАВНОВЕСИЯ НАКЛОННОГО СЛОЯ БИНАРНОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ

Любимова Т.П., Прокопьев С.А.

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

Исследуется тепловая конвекция наклонного слоя бинарной жидкости, находящегося под действием гравитационного поля и высокочастотных вибраций малой амплитуды, при наличии заданных вертикальных градиентов температуры и концентрации. Предполагается, что твердые границы слоя имеют высокую теплопроводность и непроницаемы для вещества. Перекрестные эффекты (эффекты Соре и Дюфура) не учитываются. Данный вид конвекции также известен как двойная диффузионная конвекция, поведение жидкости в таких системах может быть существенно осложнено взаимодействием диффузии и теплопроводности.

Двойная диффузионная конвекция участвует во многих природных процессах, связанных с океанографией, формированием атмосферы, а также в процессах переноса в подземных месторождениях нефти. Внешние периодические воздействия, как природные, так и техногенные, способны как увеличить, так и понизить устойчивость стационарных состояний системы. Для детального изучения задачи нами проводится линейный анализ устойчивости, включающий аналитическое и численное исследование, а также прямое численное моделирование полной нелинейной задачи.

В качестве математической модели рассматриваются уравнения термовибрационной конвекции, полученные в рамках осредненного подхода, при котором физические поля разделяются осредненную и пульсационную компоненты [1].

В рамках линейного анализа устойчивости получено условие квази-равновесия (отсутствие осредненного течения), имеющее вид:

$$Ra \cdot \sin(\alpha - \gamma) + Ra_V \cdot (1 + K) \cos \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin(\beta - \gamma) = 0.$$

Здесь число Релея, Ra , определяет интенсивность нагрева области; вибрационное число Релея, Ra_V , определяет вклад вибраций; параметр K – отношение силы плавучести, вызванной градиентом концентрации, к силе плавучести, вызванной градиентом температуры; углы α, β, γ соответственно задают наклон слоя, направление вибраций и направление градиента плотности (т.е. градиентов температуры и концентрации).

Из условия квазиравновесия следует, что для наличия такого состояния необходимо, чтобы сила тяжести была параллельна градиенту плотности и выполнялось одной из трех следующих условий: 1) слой горизонтален ($\alpha = 90^\circ$), 2) вибрации ортогональны слою ($\beta = 90^\circ$), 3) направление вибраций параллельно силе тяжести и градиенту плотности.

Критические параметры (пороги возникновения конвекции) определялись численно с помощью метода пристрелки. На рис. 1 представлены карты устойчивости на плоскости (Ra, Ra_V) для горизонтального слоя и различных направлений вибраций (а) и наклонного слоя при перпендикулярных слою вибрациях (б).

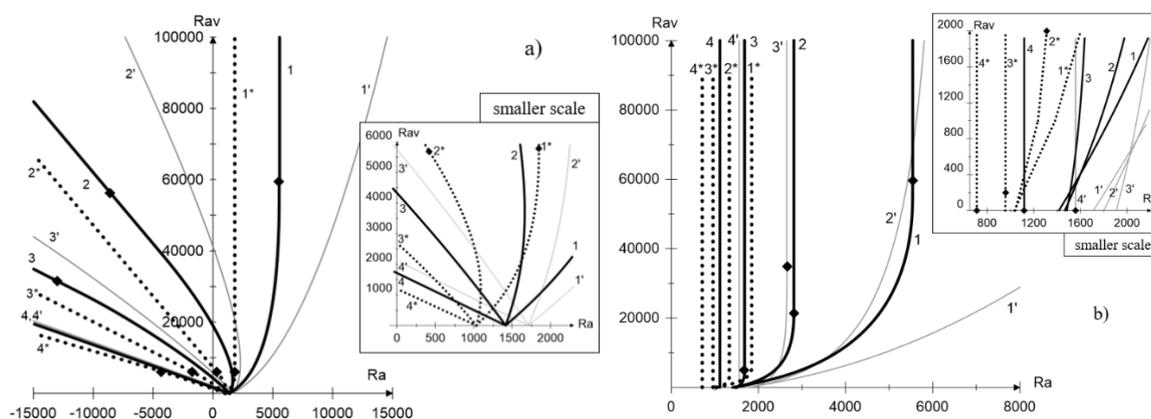


Рис. 1. Карты устойчивости. а) – горизонтальный слой, 1: $\beta = 90^\circ$, 2: $\beta = 60^\circ$, 3: $\beta = 40^\circ$, 4: $\beta = 0^\circ$; б) – наклонный слой, 1: $\alpha = 90^\circ$, 2: $\alpha = 60^\circ$, 3: $\alpha = 40^\circ$, 4: $\alpha = 0^\circ$. Серые линии – однокомпонентная жидкость ($K = 0$), черные линии – бинарная жидкость $K = 0.001$, пунктирные линии – бинарная жидкость $K = 0.003$. Символ ромба обозначает порог, выше которого наблюдается длинноволновая неустойчивость. Зоны устойчивости расположены слева от кривых.

Из линейного анализа устойчивости найдено, что в случае горизонтального слоя (рис. 1, а) поперечные вибрации повышают порог устойчивости, тогда как с уменьшением угла наклона вибраций устойчивость заметно снижается. Кроме того, по мере уменьшения угла наклона вибраций увеличивается длина волны наиболее опасных возмущений (уменьшается волновое число, k), вплоть до перехода к длинноволновой неустойчивости с $k = 0$. С увеличением величины градиента концентрации также происходят понижение порога устойчивости и сдвиг наиболее опасных возмущений в сторону длинноволновой неустойчивости. Результаты линейной теории в предельных случаях согласуются с известными из литературы экспериментальными данными, а также с формулами длинноволнового анализа.

В случае наклонного слоя жидкости (рис. 1, б) поперечные вибрации также повышают порог устойчивости, но при небольших углах наклона слоя. По мере уменьшения угла наклона устойчивость системы снижается, а влияние вибраций уменьшается вплоть до предела вертикального слоя, при котором вибрации не оказывают никакого эффекта.

Прямое численное моделирование проводилось для ячейки слоя с периодическими граничными условиями на боковых границах. Длина ячейки при этом выбиралась соответствующей длине волны наиболее опасных возмущений. Результаты нелинейных расчетов количественно и качественно согласуются с результатами линейной теории устойчивости [2].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.1.

Литература

1. Gershuni G. Z. and Lyubimov D. V. Thermal Vibrational Convection. NY: Wiley, 1998. 358 p.
2. Lyubimova T. P., Lyubimov D. V., Prokopen S. A. Stability of quasi-equilibrium of a binary fluid-inclined layer under the action of high-frequency vibrations // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36. No. 10. P. 104106. <https://doi.org/10.1063/5.0226234>

КОНВЕКТИВНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ОКОЛО ТВЕРДОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, НАСЫЩЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ, ПРИ НАГРЕВЕ СВЕРХУ

Любимова Т.П., Садилов Е.С.

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

Изучаются конвективные движения около цилиндрического твёрдого включения в пористой среде, насыщенной жидкостью. Вдали от включения предполагается наличие постоянного вертикального градиента температур, направленного вверх, что соответствует устойчивой стратификации. Геометрия задачи представлена на Рис. 1.

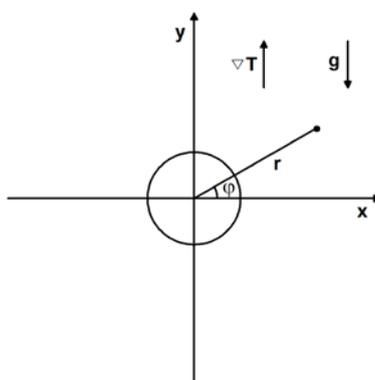


Рис. 1. – Геометрия задачи

В рассматриваемой системе в отсутствие включения конвективные течения отсутствовали бы, а все возмущения затухали. Наличие включения с теплопроводностью, отличающейся от теплопроводности жидкости, приводит к возмущению распределения температуры и появлению горизонтальных градиентов. Это делает состояние механического равновесия невозможным, в жидкости возникает конвективное движение.

Для описания конвективного движения в жидкости используется приближение Дарси-Буссинеска. Внутри включения решается тепловая задача. На границе жидкости и включения ставятся условия непрерывности температуры и теплового потока. На бесконечности задаётся линейный профиль температуры, соответствующий нагреву сверху. Рассмотрение ведётся в рамках двумерного подхода.

Для аналитического исследования используется аналог приближения Озеена. Необходимость в данном приближении возникает в связи с тем, что в данной системе наблюдается парадокс Уайтхеда, когда при разложении в ряд по числу Рэлея по методу Стокса, часть членов разложения не может быть удовлетворена граничным условиям на бесконечности. Это связано с тем, что на больших расстояниях требуется учет нелинейных слагаемых, которые при обычном разложении в ряд по числу Рэлея не учитываются. В приближении Озеена нелинейное слагаемое учитывается упрощенным образом, что позволяет решить проблему. В используемом в настоящей работе приближении Озеена, в отличие от классического приближения Озеена, задаче квазилинеаризация производится для уравнения энергии, а не импульса, как в классической задаче об обтекании тела.

Данная задача позволяет достаточно далеко продвинуться в аналитическом исследовании задачи. Для случая идеально теплопроводного тела, когда его температуру

можно считать постоянной, удастся найти аналитическое решение в виде бесконечного ряда по известным функциям, которое точно удовлетворяет граничным условиям. Получена асимптотика для радиальной компоненты скорости в горизонтальной плоскости, проходящей через центр включения. Скорость пропорциональна расстоянию от тела в степени минус три вторых.

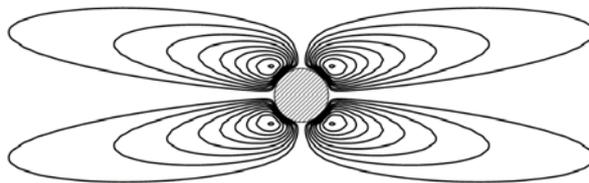


Рис. 2. – Изолинии функции тока для идеально теплопроводного тела при числе Рэлея, равном 16 (приближение Озеена).

Для случая конечной теплопроводности включения также удастся получить решение в виде бесконечного ряда, но при нахождении коэффициентов данное разложение придется обрезать, чтобы удовлетворить граничным условиям. Рассмотрен также предельный случай малой теплопроводности включения, он получается, как частный случай для задачи с включением, конечной теплопроводности.

Анализ результатов, полученных в рамках приближения Озеена, показывает, что конвективное движение, возникающее около включения, имеет вид четырех вихрей. При малых числах Рэлея вихри расположены под углом к горизонту примерно 45 градусов. При увеличении числа Рэлея вихри вытягиваются в горизонтальном направлении (см. Рис. 2). На Рис. 3 приводятся профили радиальной скорости в двух срезях для идеально теплопроводного включения при разных числах Рэлея. С увеличением числа Рэлея их интенсивность увеличивается, а толщина уменьшается. На Рис. 4 приводятся аналогичные профили, но для случая конечной теплопроводности включения.

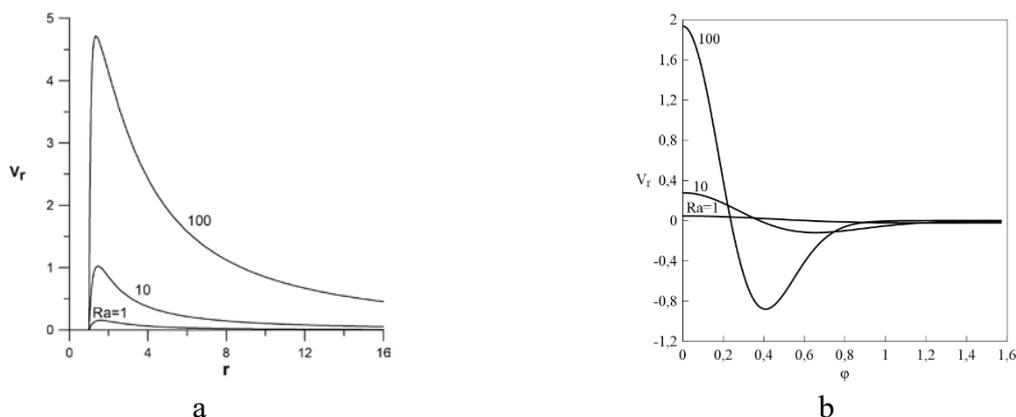


Рис. 3. – Зависимость радиальной скорости от радиуса r для $\varphi = 0$ (a) и от угла φ для $r = 5$ (b). Цифры 1, 2, 3 на рисунках соответствуют значениям числа Рэлея, равным 1, 10, 100.

При этом, если теплопроводность включения больше теплопроводности жидкости, то жидкость в горизонтальной плоскости, проходящей через центр включения, течет в направлении тела. Если же теплопроводность включения меньше теплопроводности жидкости, то направление течения жидкости в центральной горизонтальной плоскости противоположное. При равенстве теплопроводностей включения и жидкости движение отсутствует.

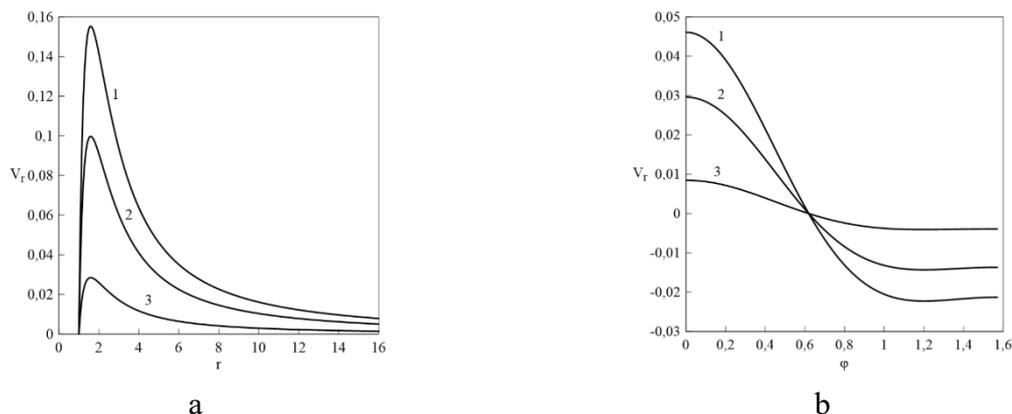


Рис. 3. – Зависимость радиальной скорости от радиуса r для $\varphi = 0$ (а) и от угла φ для $r = 5$ (б). Цифры 1, 2, 3 на рисунках соответствуют значениям отношений теплопроводности твёрдого тела и жидкости, равным ∞ , 5 и 1.5 (для числа Рэлея, равного 1).

Проведено также численное исследование задачи методом конечных разностей с целью анализа области применимости приближения Озеена. Численное исследование проводилось для расчётной области, представляющей собой одну четверть круга с учётом условий симметрии. На Рис. 3 приведены результаты расчётов для случая идеально теплопроводного включения. Сопоставление результатов показало хорошее количественное согласие аналитических и численных результатов для чисел Рэлея, меньших 100. При больших числах Рэлея имеется качественное согласие результатов.

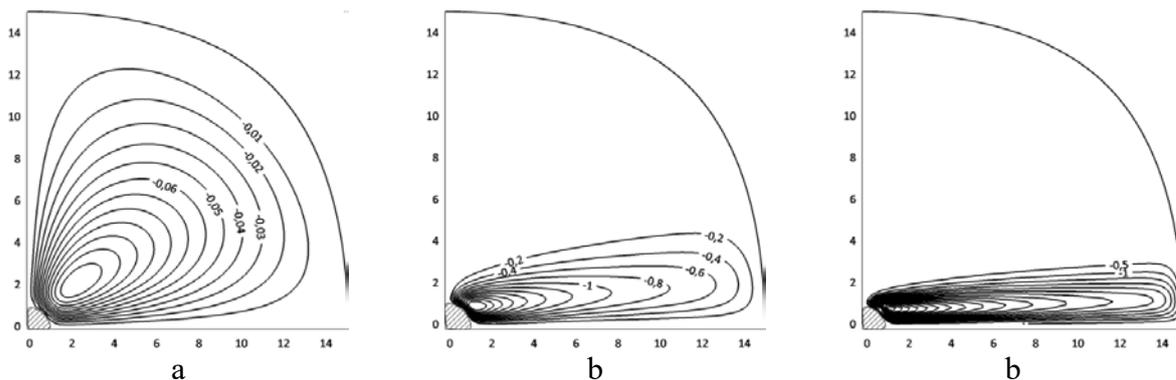


Рис. 3. – Изолинии функции тока для идеально теплопроводного включения при числах Рэлея, равных 1 (а), 100 (б), 1000 (с).

Конвективные структуры, подобные обнаруженным в настоящей работе, могут наблюдаться в антиклинальных геологических складках, которые имеют дугообразную форму, с ядром, состоящим из более древних пород, в центре складки (снизу). Если верхняя часть складки обладает низкой проницаемостью для нефти, то она может находиться внутри антиклинали. Если и ядро обладает низкой проницаемостью (а центральная часть более высокой проницаемостью), то возникает конфигурация, похожая на рассмотренную в настоящей работе. Градиент температуры, направленный вверх может наблюдаться в районах вечной мерзлоты в самый тёплый период времени. Похожие явления должны наблюдаться и при распространении загрязнений в почве, поскольку математическая постановка задачи о концентрационной конвекции близка к тепловой.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.1.

КОНВЕКЦИЯ СОРЕ В СЛОИСТОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ АНТИКЛИНАЛЬНУЮ ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СКЛАДКУ

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

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

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

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

В настоящей работе изучается индуцированная эффектом Соре конвекция бинарной смеси жидких углеводородов тетралина и додекана, взятых в равных долях, в трехслойной пористой среде, слои которой имеют различную проницаемость и форму симметричной антиклинальной геологической складки (Рис. 1). Компоненты рассматриваемой смеси являются представителями основных групп соединений, входящих в нефть. Длина расчетной области составляет 200 м, ширина – 100 м, высота каждого слоя – 25 м. Эти размеры характерны для пластов, содержащих углеводороды. При таких геометрических размерах угол складки (угол между наклонными плоскостями) составляет примерно 152 градуса.

Моделирование проводится в рамках уравнений Дарси-Буссинеска [7] с учетом эффекта Соре. Границы расчетной области твердые, непроницаемые для вещества. На верхней и нижней границах задается распределение температуры, соответствующее строго вертикальному градиенту (среднему геотермальному градиенту на глубинах залегания нефти). Боковые границы считаются теплоизолированными. Для концентрации на внешних границах задается нулевой поток вещества. На границах между слоями считаются выполненными условия непрерывности давления, нормальной компоненты скорости, температуры, концентрации, теплового потока, потока вещества.

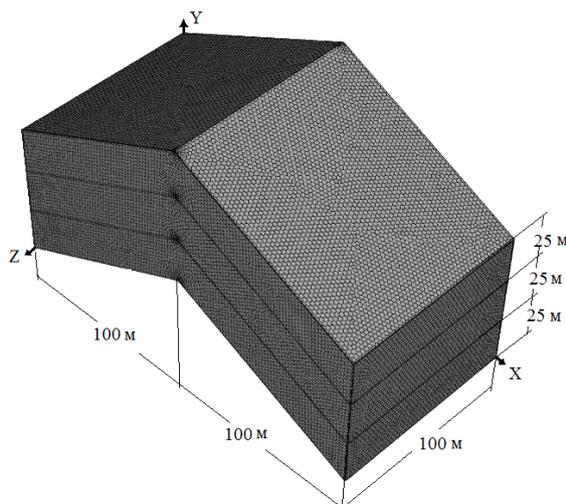


Рис. 1. – Модель антиклинальной складки

Сначала было проведено решение линейной задачи для наклонного пористого слоя бесконечной протяженности, насыщенного бинарной смесью, при этом вводился параметр трёхмерности $\zeta = k_x / k$ ($k^2 = k_x^2 + k_z^2$, k_x и k_z – волновые числа в направлениях x и z) [6]. Численное исследование проводилось при фиксированных значениях коэффициента разделения $\psi = 0,694$ и числа Льюиса $Le = 150$, соответствующих параметрам смеси тетралина (50%) и додекана (50%).

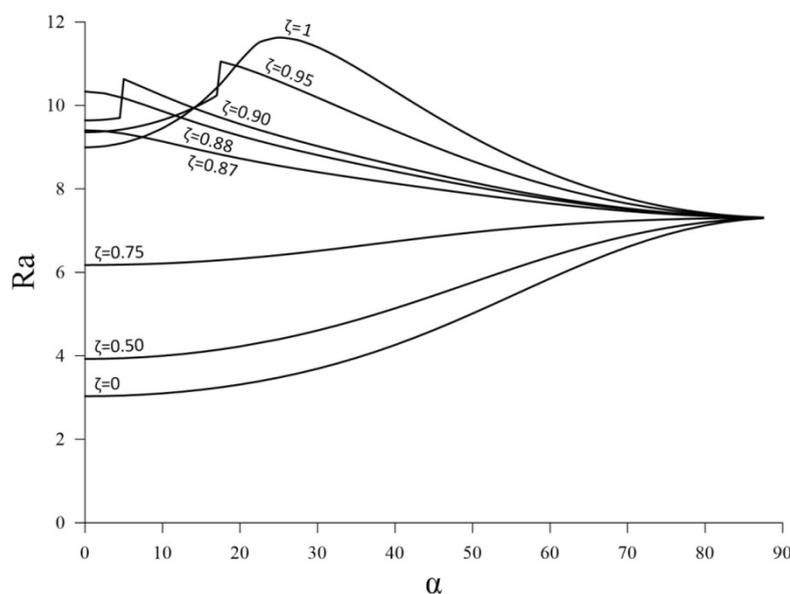


Рис. 2. – Зависимости минимального критического числа Рэлея от угла наклона слоя α для различных значений параметра трехмерности ζ

Результаты линейных расчетов представлены на Рис. 2. Видно, что абсолютный минимум критического числа Рэлея во всем диапазоне углов наклона слоя реализуется для возмущений с $\zeta = 0$ (валы с осями, направленными вдоль слоя), в дальнейшем будем называть такие возмущения продольными валами. При переходе через $\zeta = 0,88$ на кривых появляется скачок, при котором происходит смена типа неустойчивости с длинноволновой на ячеистую.

Нелинейные расчеты проводились для трехслойной системы (Рис. 1) с низкими проницаемостями верхнего и нижнего слоев (модель литологически ограниченной

залежи). Найдено, что при проницаемости среднего слоя, равной 10^{-12} м^2 и выше течение имеет структуру продольных валов (Рис. 3). На Рис. 3 показаны изолинии вертикальной компоненты скорости, иллюстрирующие эту структуру в плоскости крыльев складки (плоскость проходит вдоль среднего слоя на середине его высоты). На сгибе складки валы имеют расширение, а на поверхности оси складки наблюдаются ячейки поперек валов. Структура течения вдоль крыльев складки соответствует той, которая была обнаружена при исследовании линейной устойчивости: безразмерное волновое число $k = 1,66$ при выборе полутолщины слоя в качестве масштаба длины означает, что в ширину расчетной области, равную 100 м, укладывается 2 длины волны.

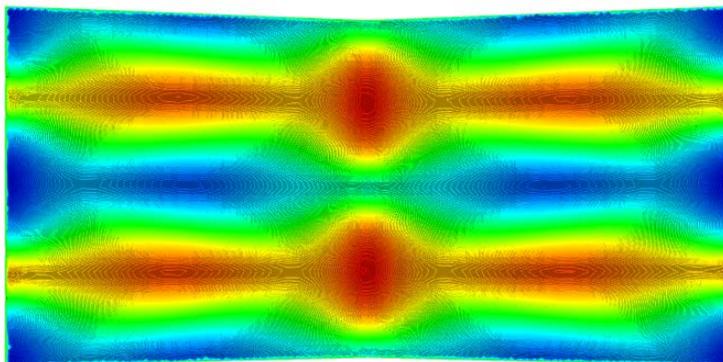


Рис. 3. Изолинии вертикальной составляющей скорости в плоскости крыльев складки (вид сверху или снизу) при проницаемости среднего слоя, равной 10^{-12} м^2 , $t = 10^4$ лет

Найденное течение локализуется в среднем слое и существенно деформирует изолинии концентрации. С ростом проницаемости характер развития течения становится резко нелинейным, а перестройка течения к продольным валам требует больше времени.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.1.

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. Baghoee 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. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. New York: Springer, 2013. 778 p.

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ КРЫШКИ НА СТРУКТУРУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ

Шарифулин В.А.^{1,2}, Белобородов Ф.С.², Шарифулин А.Н.², Любимова Т.П.¹

¹«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Аналитически в рамках маломодовой модели и численно методом конечных разностей исследуется влияние низкочастотных осцилляций (плавного циклического изменения скорости, т.е. числа Рейнольдса) верхней стенки на конвекцию в квадратной полости. Все стенки полости предполагаются твердыми. Полость подвергается воздействию гравитационного поля. Боковые стенки полости идеально теплоизолированы, а верхняя и нижняя стенки изотермичны, причем температура нижней стенки выше.

Исследование влияния движения верхней стенки полости на надкритические конвективные режимы было начато в [1]. Было показано, что движение стенки приводит к тому, что одно из надкритических течений становится аномальным (движение стенки уменьшает его амплитуду), существующим лишь в окрестности нулевого числа Рейнольдса. Критическое значение определенного по скорости движения крышки числа Рейнольдса, выше которого аномальное двухвихревое течение становится невозможным, и его зависимость от надкритичности $r = Ra/Ra_c$ в этой работе не были определены.

В настоящей работе в рамках маломодовой модели и методом конечных разностей определена зависимость критического числа Рейнольдса от надкритичности (бифуркационная кривая), ограничивающая область существования аномального течения (рис. 1а). Видно, что в окрестности $r=1$ маломодовая модель демонстрирует поведение, качественно и количественно схожее с тем, что получается методом конечных разностей. На рис. 1б показаны сечения поверхности стационарных решений представленные далее на рис 2.

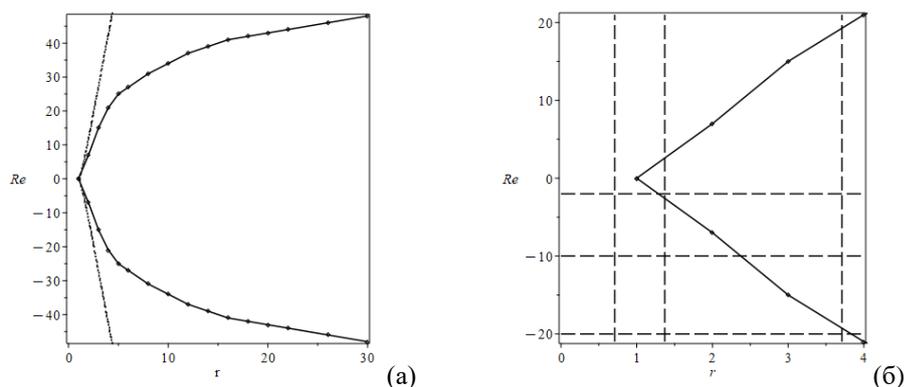


Рис. 1. Бифуркационные кривые (а) и сечения поверхности стационарных решений, которым соответствуют представленные далее на Рис. 2 бифуркационные диаграммы (б). Сплошные линии – результаты, полученные методом конечных разностей, пунктирные линии – результаты, полученные в рамках маломодовой модели.

В отсутствие движения крышки реализуется вилочная бифуркация (Рис. 2а), характерная для тепловой конвекции в подогреваемой снизу квадратной полости [2].

Движение стенки приводит к ее разрушению. При этом, в отличие от случая, когда вырождение снимается наклоном полости [3], наличие движущейся стенки приводит не только к тому, что движение существует всегда независимо от действия подъемной силы, но и к качественному изменению структуры течения – она приобретает двухэтажный характер. Такая картина аналогична случаю жидкости с температурной инверсией плотности [4]. Разделение на ячейки происходит по вертикали, в связи с этим представляет интерес изучение влияния аспектного отношения на структуру течения.

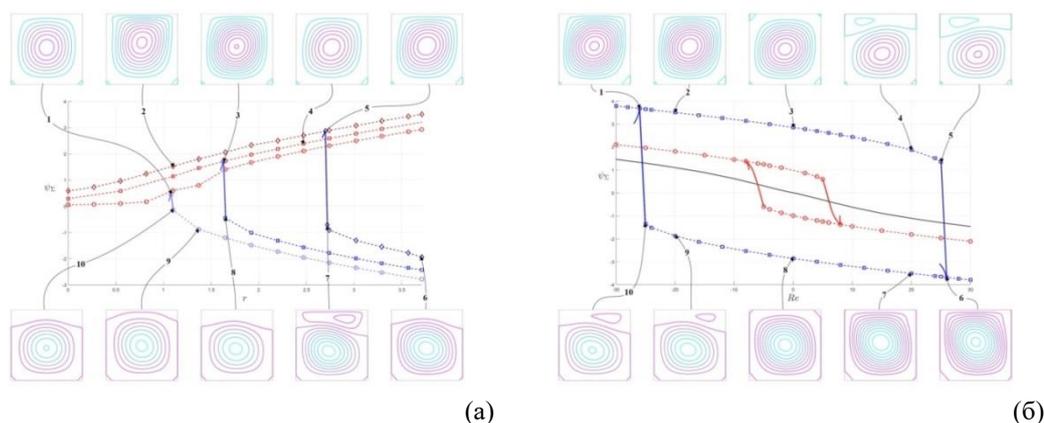


Рис. 2. Зависимости осредненной функции тока ψ_{Σ} от надкритичности для трех значений числа Рейнольдса $Re = -2, -10, -20$ (а) и от числа Рейнольдса для трех значений надкритичности r (б). Сплошная линия соответствует $r = 0.71$, пунктирная красная линия $r = 1.37$, пунктирная синяя $r = 3.71$.

Расчеты, проведенные для значений числа Грасгофа вплоть до тридцатикратной надкритичности, показали, что для каждого надкритического значения числа Грасгофа существует критическое значение числа Рейнольдса $Re_c(r)$, такое, что при плавном циклическом изменении числа Рейнольдса внутри интервала $-Re_c < Re < Re_c$ течение плавно перестраивается, меняя структуру с нормальной одновихревой на аномальную двухвихревую и обратно (см. вставки 1-5 или 6-10 Рис. 2б). Если при изменении числа Рейнольдса происходит выход за пределы указанного интервала, наблюдается жесткий гистерезисный переход от аномального течения к нормальному (см. вставки 5-6 или 10-1 Рис. 2б). Важным вопросом для дальнейших исследований является изучение трехмерных диссипативных структур, возникающих при переходе от аномального течения к нормальному.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.2.

Литература

1. Тарунин Е.Л. Ветвление решений уравнений конвекции в замкнутой полости с подвижной границей при нагревании снизу // Современные проблемы тепловой гравитационной конвекции. Минск. – 1974. – С. 51-58.
2. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука. 1972.
3. Sharifulin, A. N., & Poludnitsin, A. N. The borders of existence of anomalous convection flow in the inclined square cylinder: Numerical determination //St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. – 2016. – Vol.2. – No. 2. P. 150-156.
4. Sharifulin, V. A., and T. P. Lyubimova. "Structure of critical perturbations in a horizontal layer of melted water with the prescribed heat flux at the boundaries //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 208. – No. 1. – P. 012025.

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОЙ ОБЛАСТИ

Любимова Т.П., Казимарданов М.Г.

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

Настоящая работа посвящена исследованию влияния вибраций на возникновение конвективного движения вязкопластической жидкости в квадратной полости при нагреве сбоку. Конвекция вязкопластической жидкости в замкнутой полости в статическом поле тяжести впервые рассматривалась в работе [1], где в рамках реологической модели Уильямсона, позволяющей проводить расчеты единым образом во всей полости, исследовалась конвекция вязкопластической жидкости в квадратной полости при нагреве сбоку. Обнаружено, что в отличие от случая ньютоновской жидкости, в жидкости Уильямсона при малых значениях числа Рэлея наблюдается лишь слабое конвективное движение, а резкий рост интенсивности течения наблюдается при достижении некоторого значения числа Рэлея Ra^* , зависящего от предельного напряжения сдвига. В этой же работе, из условия баланса моментов сил, действующих на жидкость, получено выражение для порогового значения числа Рэлея Ra^* , при котором возникает конвекция жидкости Бингама в квадратной полости при нагреве сбоку. В работе [2] сформулированы два вариационных принципа, с помощью которых найдены приближения сверху и снизу для порогового числа Рэлея, определяющего возникновение движения жидкости Бингама в нагреваемой сбоку квадратной полости.

Настоящая работа посвящена численному исследованию влияния вибраций конечной амплитуды и частоты на возникновение конвективного движения вязкопластической жидкости в квадратной области при нагреве сбоку. Для описания конвективного движения жидкости используются уравнения свободной тепловой конвекции в приближении Буссинеска. Вязкопластическое поведение жидкости описывается с помощью модели Балкли-Гершеля [3]:

$$\bar{\tau} = \mu_0 \dot{\gamma} \quad \text{при } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0, \quad \bar{\tau} = \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \right)^{n-1} \right) \quad \text{при } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0, \quad \dot{\gamma}_0 = \tau_0 / \mu_0, \quad \gamma = \left(\frac{1}{2} \dot{\gamma} : \dot{\gamma} \right)^{1/2}$$

Границы полости считаются твердыми, на них задается условие прилипания. На вертикальных границах полости задаются постоянные разные температуры, на горизонтальных границах - линейное распределение температуры.

Численные расчеты проводились с использованием пакета прикладных программ ANSYS Fluent. Основные расчеты были проведены с использованием равномерной пространственной сетки 100x100. Шаг по времени был выбран из условий устойчивости схемы и минимума времени вычислений для проведенных тестовых задач и составлял 0.1 с.

Параметры жидкости и ускорение силы тяжести в расчетах были фиксированными: плотность 998 кг/м³, $g = 9.81$ м/с²; коэффициент теплового расширения 0.0015 1/К, удельная теплоемкость при постоянном давлении 4183 Дж/кг·К, коэффициент теплопроводности 0.599 Вт/м·К, реологические параметры $\mu_0 = 10$ кг/м·с, $\tau_0 = 0.0002850$ Н/м², $n = 1.0$, $K = 0.01$ кг·сⁿ⁻²/м, $\dot{\gamma}_0 = 2.85e-5$ 1/с. Вычисления проводились в отсутствие вибраций и при наличии вибраций с частотой 5 Гц и амплитудой 5 мм.

На рисунке 1 приведены зависимости максимального значения функции тока в полости (в единицах начальной вязкости) от числа Рэлея в отсутствие и при наличии вибраций. Как видно, вибрации приводят к существенному понижению порога конвекции: в отсутствие вибраций пороговое значение числа Рэлея составляет примерно 6750, что согласуется с результатами работы [1], при наличии вибраций с выбранными параметрами $Ra^* \approx 4700$, что примерно в 1.4 раза меньше, чем без вибраций.

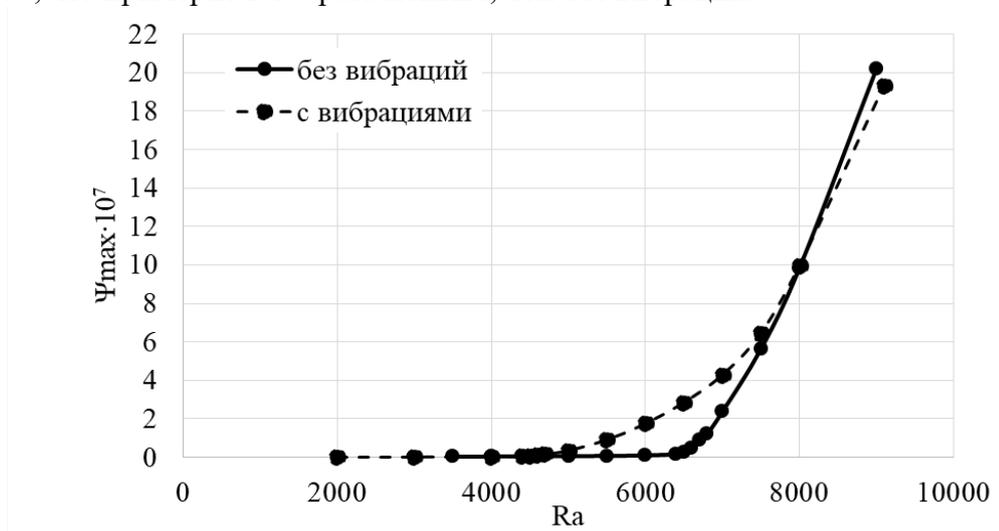


Рис. 1. – Зависимости максимального значения функции тока в полости от числа Рэлея в отсутствие (сплошная линия) и при наличии (штриховая линия) вибраций

По полученным в расчетах полям компонент тензора вязких напряжений определены зоны квазитвердого течения. Как и в [1], критерием для определения зон квазитвердого движения служило условие $\sqrt{T_2} < \tau_0$, где T_2 – второй инвариант тензора вязких напряжений, τ_0 – предельное напряжение сдвига. Найдено, что, как и в статическом поле тяжести, при достижении некоторого порогового числа Рэлея возникает узкая замкнутая зона вязкопластического течения, примыкающая к границам полости, основную часть полости занимает зона квазитвердого движения, в углах полости имеются «застойные» зоны. При увеличении числа Рэлея зона квазитвердого движения уменьшается в размере, а при $Ra = 40000$ исчезает совсем, остаются лишь «застойные» зоны в углах полости.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.2.

Литература

1. Любимова Т.П. Численное исследование конвекции вязкопластичной жидкости в замкнутой области. МЖГ. 1977. №1. С. 3–8.
2. Любимов Д.В., Любимова Т.П. О применении вариационных принципов в задаче о конвекции вязкопластичной жидкости. Конвективные течения, Вып.1, Пермь, 1979, С.81-86.
3. Herschel W. H. & Bulkley R. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. Kolloid Zeitschrift. 1926. Vol 39. P. 291-300

КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ В РАМКАХ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ КОЗЕНИ- КАРМАНА

Клименко Л.С., Марышев Б.С.

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

Настоящая работа посвящена изучению концентрационной конвекции в горизонтальном слое пористой среды при наличии иммобилизации и закупорки. Фильтрация смеси, состоящей из несущей жидкости и примеси, создается заданным постоянным перепадом давления. Между границами слоя поддерживается постоянный перепад концентрации. Предполагается, что некоторая часть примеси может оседать на стенках твердой матрицей среды, или быть неподвижной, попадая в так называемые застойные зоны. В литературе такое явление наиболее часто описывается в рамках МИМ (mobile/immobile media) подхода. [1]. Согласно такому подходу примесь делится на две фазы: мобильную (подвижную) и немобильную (неподвижную, адсорбированную). Кроме этого, в этом подходе задается переход примеси между фазами с помощью кинетического уравнения. В настоящей работе выполнено исследование для любых значений начальной концентрации, по этой причине необходимо учитывать возможное насыщение немобильной фазы, которое имеет место в случае больших начальных концентраций примеси. Это связано с тем фактом, что площадь твердой матрицы среды ограничена, следовательно, создаются ограничения и по количеству накапливаемой примеси [2]. Для этого была использована нелинейная МИМ модель [3] второго порядка, учитывающая насыщение немобильной фазы по изотерме Ленгмюра. Для описания течения через слой пористой среды было использовано приближения Дарси-Буссинеска [4]. Кроме того, в настоящей работе был рассмотрен эффект закупорки, а именно снижение проницаемости среды, вызванного сужением пор в результате взаимодействием примеси со стенками пор. Для описания такого явления часто в литературе используют модель Козени-Кармана [5]. Однако, как было показано в работе [6], для некоторых материалов, широко применяемых на практике, это соотношение не выполняется и гораздо лучше подходит так называемое обобщенное соотношение [6], которое и было использовано в настоящей работе.

Таким образом, система уравнений для транспорта примеси в пористой среде с учетом произвольной закупорки в безразмерном виде может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} (1 - \zeta Q) \partial_t C + \zeta \left(\frac{1}{C_0} - C \right) \partial_t Q &= -\mathbf{U} \cdot \nabla C + (1 - \zeta Q) \Delta C - \zeta \nabla Q \cdot \nabla C, \\ U_x &= \frac{\kappa}{\kappa_0} \left(-\frac{\partial}{\partial x} P + R_p C \right), \quad U_y = -\frac{\kappa}{\kappa_0} \frac{\partial}{\partial y} P, \quad \operatorname{div} \mathbf{U} = 0 \\ \partial_t Q &= a(1 - Q)C - bQ, \quad \kappa(\phi) = \frac{\phi^{3+\sigma}}{(1 - \phi)^{2\eta}}, \quad \phi = \phi_0(1 - \zeta Q), \end{aligned} \quad (1)$$

где C, Q – объемные концентрации мобильной и немобильной компонент примеси, ϕ – пористость среды, P – давление, \mathbf{U} – вектор скорости фильтрации, ϕ_0, κ_0 – пористость и проницаемость чистой среды (без примеси), κ – проницаемость среды. Система (1) содержит следующие безразмерные параметры: безразмерные коэффициенты адсорбции и десорбции $a = \alpha_d L^2 / (\phi_0 D)$, $b = \alpha_d K_d L^2 / D$, параметр закупорки $\zeta = q_0 / \phi_0$, число Пекле $Pe = \kappa_0 Ah / (D \phi_0 \mu)$ и число Рейля-Дарси $Rp = \kappa_0 C_0 \rho \beta_c gh / (\mu D \phi_0)$. Здесь D – коэффициент диффузии, α_d – коэффициент переноса примеси, K_d – коэффициент распределения примеси, q_0 – концентрация насыщения немобильной фазы, μ – динамическая вязкость, ρ – плотность несущей жидкости, β_c – коэффициент концентрационного расширения, g – ускорение свободного падения.

Настоящая задача допускает решение, соответствующее режиму стационарной горизонтальной фильтрации в следующем виде:

$$C^0 = b / a \cdot Q^0 / (1 - Q^0), \quad P^0 = R_p \int C^0 dy - Pex, \quad U^0 = \frac{\kappa}{\kappa_0} Pe,$$

$$Q^0(y) = 1 - \exp\left\{W\left[\left(\zeta - 1\right)e^{-\beta} / \zeta\right] + \beta\right\}, \quad \beta = B_1 y + B_2$$

$$B_1 = \frac{(\zeta - 1)a}{\zeta} \frac{1}{b} - \ln\left(1 + \frac{a}{b}\right), \quad B_2 = \frac{(\zeta - 1)}{\zeta}. \quad (2)$$

где W – функция Ламберта. Распределение мобильной концентрации для разных параметров представлено на Рис. 1а, также на Рис. 1б показано распределение проницаемости в рамках обобщенной модели Козени-Кармана [6], для песчаника ($\sigma = 0.424625, \eta = 0.22642$) и стекловолокна ($\sigma = 1.74183, \eta = 0.00259324$).

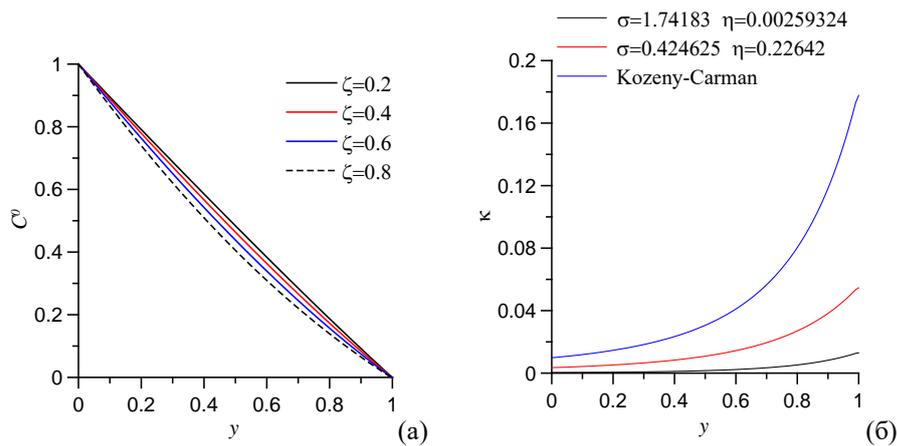


Рис. 1. – Распределение концентрации поперек слоя для различных значений коэффициента закупорки (а); распределение проницаемости поперек слоя для различных материалов, значения взяты из работы [6] (б)

Режим стационарной горизонтальной фильтрации (2) был исследован на устойчивость по отношению к малым возмущениям вида:

$$q = Q - Q^0, \quad c = C - C^0, \quad p = P - P^0, \quad \vec{U} = (U^0 - \partial_y \psi, \partial_x \psi, 0). \quad (3)$$

$$c, q, \psi \sim \exp(ikx - i\omega t + \lambda t)$$

Подставляя (3) в уравнения (1) и исключая давление, можно получить линейную задачу, описывающую эволюцию малых возмущений. Накладывая условие нейтральности возмущений $\lambda = 0$, можно получить задачу на собственные значения, т.е. условие $\lambda = 0$ достигается только при специальном выборе параметров задачи, а именно значений числа Рейля-Дарси, частоты и волнового числа для нейтральных возмущений. Уравнения, описывающие такую задачу громоздки, по этой причине не приводятся в рамках данного тезиса. Зависимость критического значения числа Рейля-Дарси, волнового числа и частоты нейтральных возмущений от параметра закупорки приведены на Рис. 2. Построены кривые, показывающие зависимости критических параметров для различных материалов, видно, что в стекловолокне наблюдается наиболее медленная динамика, связанная с малой проницаемостью.

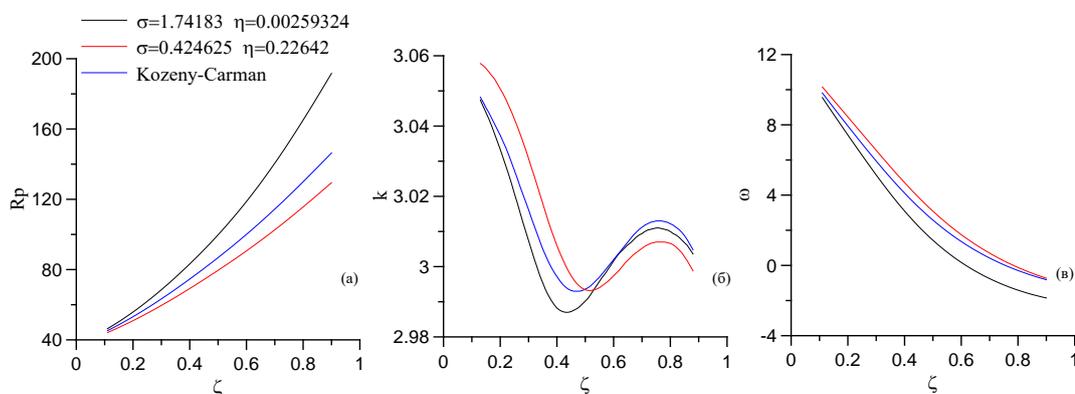


Рис. 2. – Зависимость критического значения числа Рейля-Дарси (а), волнового числа (б) и частоты нейтральных возмущений (в) от параметра закупорки для различных материалов. Параметры модели проницаемости приведены в легенде, значения выбраны согласно работе [6].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.3.

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. <https://doi.org/10.2118/493-PA>
2. Elimelech M., Gregory J., Jia X. Particle deposition and aggregation: measurement, modelling and simulation. Butterworth-Heinemann, 2013, 441 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-04548-3>
3. Selim H. M. Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multireaction models // Environ. Health Perspect.. 1989. Vol. 83. P. 69-75. <https://doi.org/10.2307/3430649>
4. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. Springer, 2017, 988 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0>
5. Carman P. C. Fluid flow through granular beds // Trans. Inst. Chem. Eng. 1937. Vol. 15. P. 150-156. [https://doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80003-2)
6. Henderson N., Bréttas 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 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.04.006>

Динамика скачкообразного движения зажатой капли

Алабужев А.А.

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

Рассматривается динамика капли жидкости, зажатой между двумя параллельными твердыми пластинами и окруженная жидкостью другой плотности. В равновесном состоянии капля имеет форму круглого цилиндра с прямым краевым углом, ось симметрии которого ортогональна пластинам. На всю систему целиком действуют вибрации, параллельные оси симметрии капли. Для описания движения линии контакта трех сред используется динамическое граничное условие [1, 2], предполагающее неоднозначную зависимость угла контакта от скорости линии контакта: линия контакта начинает скользить только тогда, когда отклонение угла контакта θ превышает определенное критическое значение θ_{cr} , в результате можно наблюдать динамику прерывистого движения:

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

где ζ – отклонение линии контакта от положения равновесия, λ — интегральный параметр (параметр Хокинга или параметр смачивания или капиллярный параметр), описывающий взаимодействие контактной линии с твердой подложкой. Другими словами, контактная линия будет стационарной, если абсолютное значение отклонения угла контакта γ меньше определенного характерного значения γ_{cr} . Экспериментально подтвержденной причиной гистерезиса угла контакта является шероховатость поверхности твердого тела, но только при покрытии очень гладких поверхностей этого можно было добиться без гистерезисного случая [2]. Условие (1) использовалось в работах [3, 4], без гистерезиса – в [5–7].

Задача решалась в малоамплитудном приближении. Значения частоты вибраций были ограничены приближением несжимаемой невязкой жидкости. Уравнение (1) определяет диссипацию энергии при движении линии контакта и ее взаимодействия с подложкой [1-7]. Решение находилось в виде рядов Фурье по собственным функциям оператора Лапласа в цилиндрической системе координат. Система нелинейных дифференциальных уравнений для амплитуд количеством $N = 300$ решалась численно.

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

Движение контактной линии отражает ее динамику. Мы видим, что эволюция системы состоит из двух взаимозаменяемых режимов. Контактная линия ζ_u остается «замороженной» (в состоянии покоя) в течение некоторого периода времени в докритической области $|\gamma_u(t)| < \gamma_{cr}$ (рис. 1а). Контактная линия продолжает скользить вдоль пластины в направлении областей, характеризующихся сверхкритическими значениями

угла контакта $|\gamma_u(t)| > \gamma_{cr}$. На рис. 1а интервалы времени, в течение которых контактная линия остается неподвижной, окрашены в красный цвет. Обратите внимание, что $\zeta_u = const$, в то время как другие характеристики изменяются. Контактная линия остается неподвижной до тех пор, пока угол контакта не выйдет за пределы докритической области.

На рис. 1б представлена зависимость максимальных значений амплитуд от частоты для одного значения параметра Хокинга. Резонансные пики отчетливо видны; значения резонансных амплитуд конечны из-за диссипации. В безгистерезисном случае линия контакта всегда находится в движении при конечных значениях параметра смачивания λ , за исключением случая «антирезонансных» частот [6, 7] (рис. 1б). Площадь неподвижной линии контакта увеличивается с ростом параметра γ_{cr} , т.е. область скольжения постепенно сменяется областью, где линия контакта находится в состоянии покоя. Следовательно, имеет место бездиссипативный случай закрепленной линии контакта, что приводит к увеличению резонансной амплитуды боковой поверхности вне линии контакта.

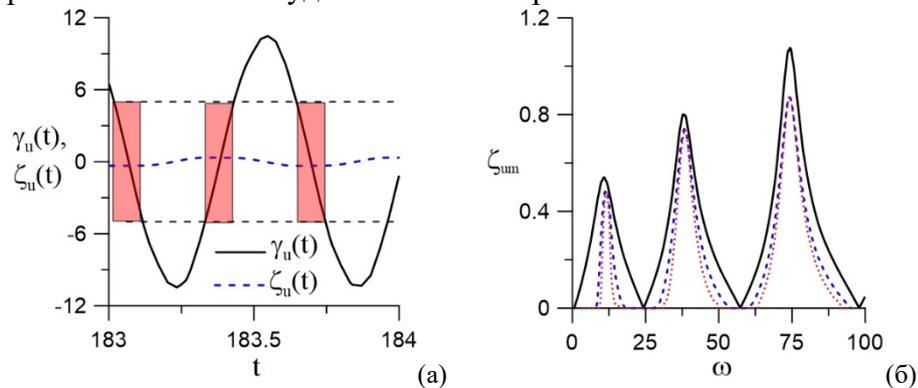


Рис. 1. - Эволюция $\gamma_u(t)$ и $\zeta_u(t)$ для $\lambda = 1$, $b = 1$, $\omega = 10$, $\gamma_{cr} = 5$ (а); амплитуда контактной линии ζ_{um} от ω для $\lambda = 1$, $b = 1$, $\gamma_{cr} = 0$ – сплошная, $\gamma_{cr} = 5$ – штриховая, $\gamma_{cr} = 10$ – пунктирная линия (б).

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.4.

Литература

1. Hocking L.M. Waves produced by a vertically oscillating plate // J. Fluid Mech. 1987. Vol. 179. P. 267 – 281. <https://doi.org/10.1017/S0022112087001526>
2. Dussan V E.B. On the Spreading of liquids on solid surfaces: static and dynamic contact lines // Ann. Rev. Fluid Mech. 1979. Vol. 11 P. 371-400. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.11.010179.002103>
3. Fayzrakhmanova I.S., Straube A.V. Stick-slip dynamics of an oscillated sessile drop // Phys. Fluids. 2009. Vol. 21, 072104. <https://dx.doi.org/10.1063/1.3174446>
4. Fayzrakhmanova I.S., Straube A.V., Shklyaev S. Bubble dynamics atop an oscillating substrate: Interplay of compressibility and contact angle hysteresis // Phys. Fluids. 2011. Vol. 23, 102105. <https://doi.org/10.1063/1.3650280>
5. Hocking L. M. The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary // J. Fluid Mech. 1987. Vol. 179. P. 253-266. <https://doi.org/10.1017/S0022112087001514>
6. Алабужев А. А. Поведение цилиндрического пузырька под действием вибраций // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7, №2. С. 151-161. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2014.7.2.16>
7. Ryankova M. A., Alabuzhev A. A. Influence of the properties of the plate surface on the oscillations of the cramped drop // Phys. Fluids. 2022. Vol. 34, 092015. <https://doi.org/10.1063/5.0101011>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ДВУХФАЗНУЮ ФИЛЬТРАЦИЮ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОЙ СРЕДЕ. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Иванцов А.О., Любимова Т.П.

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

Интерес к изучению влияния вибраций на фильтрационный перенос двухфазной жидкости в пористой среде обусловлен большим практическим значением таких исследований. Вибрационное воздействие является одним из перспективных способов управления динамикой неоднородных жидкостей в пористой среде.

Влияние вибраций на динамику двухфазной жидкости в пористой среде рассматривается в большом количестве работ. В [1] изучается влияние вибраций на неоднородные среды, разработан теоретический подход, позволяющий описывать поведение поверхностей раздела в поле высокочастотных вибраций. В [2] рассмотрена устойчивость фронта вытеснения в пористой среде, показано, что фронт вытеснения неустойчив в случае, когда вязкости вытесняющей и вытесняемой жидкости значительно отличаются. В результате, при движении фронта вытеснения на границе раздела сред могут образовываться так называемые «пальцы».

В работе [3] исследуется влияние линейно поляризованных вибраций на устойчивость плоского фронта вытеснения в пористой среде. Показано, что динамика фронта вытеснения под действием вибраций описывается уравнением Матье с диссипативными слагаемыми. Для случая высокочастотных вибраций, с использованием метода осреднения, обнаружено, что вибрации могут только повышать устойчивость системы. Установлено, что вибрационное воздействие стабилизирует плоский фронт вытеснения относительно части спектра возмущений. На практике часто встречаются ситуации, когда вытесняемая жидкость образует компактные образования, со всех сторон окруженные вытесняющей жидкостью. В [4] показано, что вибрации конечной частоты могут стабилизировать изолированную каплю конечных размеров. В рамках настоящего исследования разработана численная модель фильтрации в трещиновато-пористой среде и проведено численное моделирование динамики компактного включения под действием вибраций, либо модулированного во времени градиента давления.

Для моделирования фильтрации в трещиновато-пористой среде реализованы два подхода:

- Модель дискретной сети трещин, описывающая фильтрацию при наличии крупных трещин, т.е. когда размеры трещин сопоставимы с размерами капли. Влияние трещин в этом случае описывается с помощью изменения свойств пористой среды (коэффициентов пористости и проницаемости), т.е. явно задаются отдельные трещины и их пересечения.

- Модель двойной пористости – континуальный подход, который рассматривает трещиноватую среду как эквивалентную пористую среду с анизотропными свойствами [5, 6]. В этом случае трещиноватая среда рассматривается как две взаимосвязанные системы: сеть трещин и пористая матрица. Этот подход позволяет учесть особенности потока и транспорта в каждой из систем по отдельности, но при этом сохранять их тесную связь. Модель двойной пористости позволяет учесть значительные различия в гидравлических свойствах между трещинами и матрицей. При этом важным аспектом данной модели является корректное описание процесса обмена жидкостью между трещинами и окружающей их матрицей. В реализованной модели интенсивность обмена

предполагается пропорциональной разности давления в блоках пористой матрицы и в трещинах.

Моделирование процесса фильтрации двухфазной среды проводится методом сквозного счета. В каждой точке пространства объемные доли фаз задаются с помощью функций насыщенности. Процесс фильтрации описывается с использованием обобщенной модели Дарси, учитывающей зависимость коэффициента проницаемости от этих функций.

Разработанная программа позволяет проводить расчеты на многопроцессорных компьютерах с применением структурированной сетки, которая адаптируется к решению задачи. В ходе расчета исходная расчетная сетка делится на секции одинакового размера. Затем проводится процедура адаптации сетки под решение – «adaptive mesh refinement»: в областях, где необходимо проводить вычисления с более мелкой сеткой, создаются новые секции сетки с уменьшенным в два раза пространственным размером. Максимальная плотность узлов сетки поддерживается в областях с высокими градиентами функций насыщенности и большими скоростями фильтрации.

При моделировании процесса осаждения трехмерной осесимметричной капли используется двухполевой метод. Уравнение Пуассона для функции тока решается неявно, методом GMRES с процедурой предобуславливания. Производная по времени аппроксимируется по схеме второго порядка точности. Пространственная дискретизация выполняется методом конечных объемов второго порядка точности. Поверхностные и объемные интегралы аппроксимируются с использованием конечно-разностной аппроксимации.

Моделирование подтвердило наличие абсолютной неустойчивости фронта вытеснения в пористой среде по отношению к мелкомасштабным возмущениям в отсутствие вибраций. Показано, что независимо от соотношения вязкостей жидкостей неустойчивость поверхности включения развивается на переднем фронте движущегося включения. Вычисления, проведенные с использованием модели двойной пористости, показали, что вибрационное воздействие снижает скорость роста возмущений на границе раздела сред, а при вибрациях достаточной интенсивности удается полностью стабилизировать движущуюся каплю. В рамках расчетов, проведенных с использованием модели дискретной сети трещин, показано, что скорость фильтрации внутри трещины значительно превышает интенсивность фильтрации в пористой матрице. В данном случае вибрации подавляют коротковолновые возмущения фронта вытеснения, которые в соответствии с линейной теорией устойчивости имеют наибольшую скорость роста.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.4.

Литература

1. Любимов Д.В., Любимова Т.П., Черепанов А.А. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. М.: Физматлит. 2003. 216 с.
2. Barenblatt, G. I., Etov, V. M., & Ryzhik, V. M. Theory of Fluid Flows Through Natural Rocks. Springer Netherlands. 1990. 395 p
3. Любимов Д.В., Седельников Г.А. Влияние вибраций на устойчивость плоского фронта вытеснения в пористой среде // Изв. РАН, МЖГ, № 1, 2006. С. 6-14.
4. Lyubimova T., Ivantsov A., Lyubimov D. Control of fingering instability by vibrations // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. 2021. Vol. 16. P. 1-12. <https://doi.org/10.1051/mmnp/2021031>
5. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра. 1984. 232 с.
6. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // ПММ. 1960. Т. 24. № 5. С. 852-864.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ КАПЛИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Кучинский М.О., Галишевский В.А., Садовникова А.Д., Кирпичев В.А.,
Устюгов М.Д., Любимова Т.П.

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

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Во многих технологических процессах, например, в нефтяной промышленности, встречается эффект, получивший название неустойчивости Саффмана-Тейлора [1]. Такая неустойчивость наблюдается, если менее вязкая жидкость вытесняет более вязкую; в этом случае образуются так называемые «вязкие пальцы», искажающие фронт вытеснения.

В лабораторных условиях эффект Саффмана-Тейлора часто изучается с использованием ячейки Хеле-Шоу, представляющей из себя две соединенных между собой пластины с небольшим зазором между ними, заполненным вязкой жидкостью [2, 3]. Известно, что в следствие идентичности уравнений движения жидкости в пористой среде и в ячейке Хеле-Шоу, экспериментальные данные, полученные с использованием ячеек Хеле-Шоу могут быть сопоставлены с численными расчетами в двумерной постановке.

В настоящей работе проведено численное и экспериментальное исследование образования «вязких пальцев» при движении капли менее вязкой жидкости (воды) в более вязкой жидкости (глицерине) в поле тяжести в ячейке Хеле-Шоу.

Описание численной модели и экспериментальной установки

Для численного моделирования применяется пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics: в ходе исследования решалась задача в двумерной, несимметричной постановке (рис. 1. (a)). Для описания динамики капли в пористой среде, в каждой из жидкостей использовались уравнение непрерывности (1) и закон Дарси (2):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\vec{u} = -\frac{\kappa}{\mu} (\nabla p - \rho \vec{g}) \quad (2)$$

В уравнениях (1) - (2), ε_p - пористость, равная для ячейки Хеле-Шоу максимальному значению – 1; ρ – плотность жидкости; μ – динамическая вязкость жидкости; κ – проницаемость, пропорциональная квадрату толщины ячейки [4]; p – давление; \vec{g} – ускорение свободного падения; \vec{u} – скорость Дарси. На твердых границах считается выполненным условие непроницаемости $-\vec{n} \cdot \rho \vec{u} = 0$.

Численное моделирование движения капли выполнялось в модуле Transport of Diluted Species in Porous Media. При этом предполагается, что молярная концентрация растворенного вещества (в данном случае глицерина) равна нулю внутри капли и единице в остальной расчетной области, коэффициент диффузии предполагается малым. Уравнение переноса растворенных веществ записывается в виде

$$\varepsilon_p \frac{\partial c_i}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla c_i = -\nabla \cdot \vec{J}_i \quad (3)$$

где c_i – концентрация i -й вещества. Первый член в левой части отвечает за накопление веществ в жидкой фазе, второе слагаемое описывает конвективный перенос. Слагаемое в

правой части $-\nabla \cdot \vec{j}_i = -\nabla \cdot (D_{D,i} + D_{e,i}) \nabla c_i$ описывает перенос растворенных веществ за счет дисперсии и диффузии.

Для проведения экспериментов была изготовлена стеклянная ячейка Хеле-Шоу, имевшая размеры 180 x 110 x 0.5 мм (рис. 1 (а)). Генерация капли производилась в центральной части ячейки при помощи шприцевого насоса и иглы диаметром 0.4 мм. Воздушный зазор был заполнен глицерином с плотностью $\rho_1 = 1262 \text{ кг/м}^3$ и вязкостью $\mu_1 = 0.942 \text{ Па} \cdot \text{с}$, в качестве менее вязкой жидкости использовалась вода с $\rho_2 = 997 \text{ кг/м}^3$ и $\mu_2 = 8.95 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, подкрашенная раствором бриллиантового зеленого для наглядности эксперимента и последующей программной обработки.

Геометрия задачи повторяла параметры экспериментальной установки. Расчеты проводились с использованием неравномерной по пространству сетки, сгущавшейся к наконечнику иглы (рис. 1 (б)), что позволяло в момент образования капли проследить за деформацией границы раздела. Сетка состояла из треугольных элементов, количество которых равно 27210.

При проведении эксперимента регистрация изображения производилась при помощи цифровой камеры с контрольным источником света; в результате получался набор фотографий, сделанных с интервалом 10 с. Полученная серия изображений обрабатывалась при помощи алгоритма на Python с применением тепловых карт [5], отображающих интенсивность концентрации красителя в генерируемой капле (рис. 1 (г)).

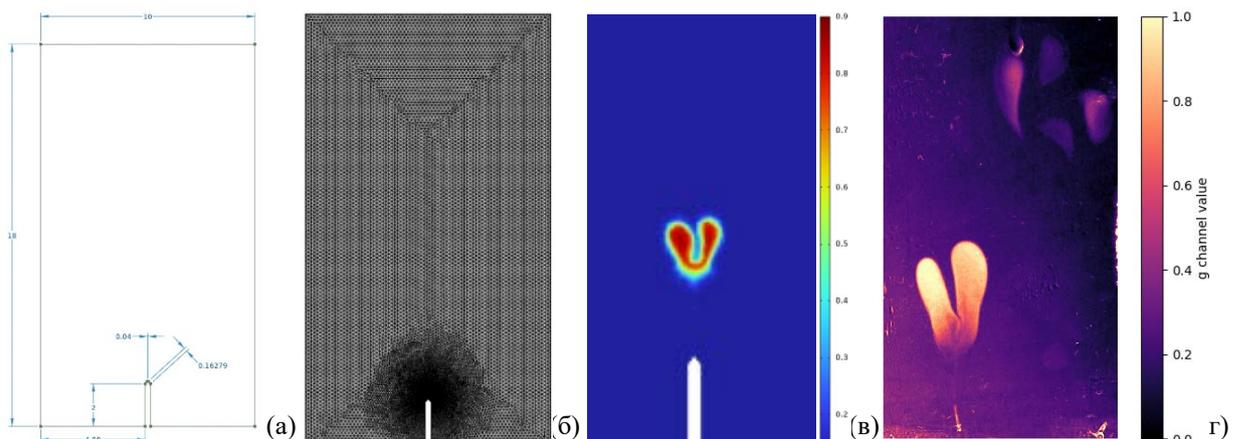


Рис. 1. – Геометрия двумерной расчетной области, соответствующая экспериментальным параметрам (а); расчетная сетка из треугольных элементов (б); полученное в расчетах распределение концентрации воды (красный цвет) и глицерина (синий цвет), иллюстрирующее образование «вязких пальцев» на переднем фронте всплывающей капли в); тепловая карта, отражающая интенсивность распределения красителя эксперименте, соответствующая численному расчету (г)

Полученные результаты

Численный и лабораторный эксперименты показали, что при всплывании первоначально круглой капли, радиуса 10 мм, глицерина в воде в ячейке Хеле-Шоу (вытеснении менее вязкой жидкостью (водой) более вязкой жидкости (глицерина)), на переднем фронте капли образуются вязкие пальцы - возникает неустойчивость Саффмана-Тейлора (рис. 1 (в, г)). В ходе дальнейшей эволюции пальцы принимают более округлую форму, после чего опять начинают искажаться – неустойчивыми становятся новые участки границы раздела (рис. 2).

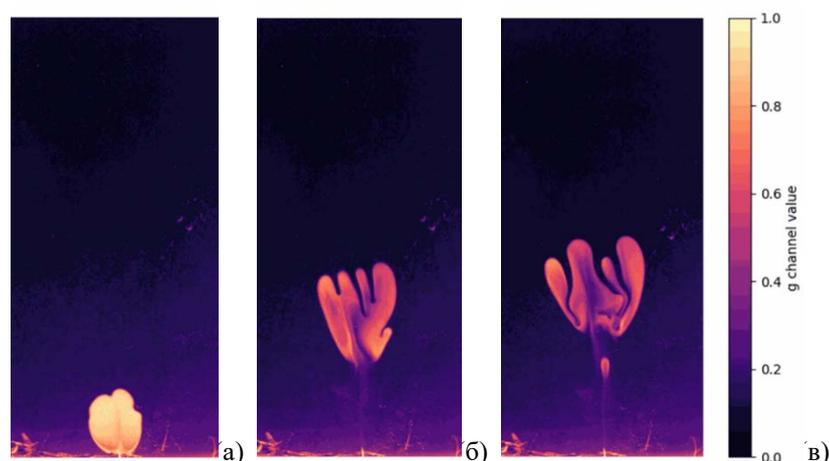


Рис. 2. – Эволюция во времени границы первоначально круглой капли воды в глицерине, образование «вязких пальцев» (неустойчивость Саффмана-Тейлора); а – 10 с; б - 5 мин; в - 10 мин.

В дальнейшем планируется исследование движения капли и устойчивости ее поверхности при наличии вибраций. Предполагается, что такое воздействие позволит повысить устойчивость границы раздела [6].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.4.

Литература

1. Бублик СА, Семин МА. Исследование неустойчивости Саффмана–Тейлора в нефтесодержащем пласте в двумерной постановке задачи. Математическое моделирование. 2020;32(7):127-42.
2. Логвинов О.А. Об устойчивости боковой поверхности вязких пальцев, образующихся при вытеснении жидкости из ячейки Хеле-Шоу. Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2011(2):40-6.
3. Матвеев ВН, Кирсанов ЕА. Вязкость и структура дисперсных систем. Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2011;52(4):243-76.
4. Федер Е. Фракталы. Мир; 1991.
5. Kuchinskiy M, Lyubimova T, Rybkin K, Sadovnikova A, Galishevskiy V. Investigation of Cavitation in NaCl Solutions in a Sonochemical Reactor Using the Foil Test Method. Fluid Dynamics & Materials Processing. 2024 May 1;20(5).
6. Lyubimova T, Ivantsov A, Lyubimov D. Control of fingering instability by vibrations. Mathematical Modelling of Natural Phenomena. 2021;16:40.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СКАЧКА ПЛОТНОСТИ ПРИ СЛИЯНИИ РЕК

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

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

В поверхностных водных объектах, на границах раздела водных масс, характеризующихся значительно различающимися минерализациями (плотностями), могут возникать волновые структуры. Данный эффект был впервые описан в [1] для сливающихся рек Сылва и Чусовая, находящихся в подпоре от Камской ГЭС. Для изучения особенностей формирования таких волновых структур необходимо детальное исследование условий формирования скачка плотности. Как показано в [2], если скорость течения в зоне слияния достаточно мала, то возможно формирование вертикальной стратификации водных масс, существенно влияющее на гидродинамику рассматриваемого водного объекта. Как правило, исследования ограничиваются рассмотрением влияния лишь одного фактора на формирование плотностной стратификации водных масс. В то же время, как существенный теоретический, так и непосредственный практический интерес, представляет анализ одновременного влияния нескольких факторов. В настоящей работе исследуется влияние на формирование слоистых структур двух факторов: температуры и минерализации вод.

Особенностью зоны слияния рек Сылва и Чусовая является то, что она находится в подпоре от плотины Камской ГЭС. При этом в данной зоне расположен основной водозабор питьевой воды г. Перми (Чусовские очистные сооружения, ЧОС). В проведенных ранее исследованиях была выявлена характерная особенность данного участка Камского водохранилища – в зимний период водные массы характеризуются значительной вертикальной неоднородностью. В придонных горизонтах движутся более плотные воды р. Сылва, характеризующиеся повышенной жесткостью воды, достигающей 13-14 единиц, при общей минерализации воды ~ 1 г/л, а в приповерхностных горизонтах существенно менее плотные воды р. Чусовой с меньшей жесткостью воды.

Близость ЧОС к плотине Камской ГЭС (расстояние до гидроузла составляет порядка 16 км) обуславливает влияние неравномерности сбросов воды из верхнего бьефа ГЭС в нижний (резкие изменения сбросных расходов воды через плотину гидроузла) на гидродинамический режим исследуемого участка водоема.

В летний период температура воды в водохранилище в районе ЧОС в поверхностном горизонте может достигать 25°C . В то же время, в придонных горизонтах, из-за значительных глубин (около 20 м), может сохраняться с периода прохождения весеннего паводка менее минерализованная, но значительно более холодная вода с температурой около $10-15^{\circ}\text{C}$. Воды рек Сылва и Чусовая, из-за существенно более малых глубин, значительно более равномерно прогреваются и их температуры могут считаться близкими. В этих условиях теплые и значительно менее минерализованные воды р. Чусовой «надтекают» на также теплые, но более минерализованные воды р. Сылвы. Однако в самом придонном горизонте на Чусовском плесе Камского водохранилища сохраняются более холодные воды с большей плотностью, но меньшей минерализацией.

Повышение температуры воды в придонном слое приводит к снижению плотности воды (а, соответственно, и минерализации, и удельной электропроводности (удельная электропроводность воды измеряется значительно проще, чем минерализация, поэтому в

прикладных исследованиях, как правило, используется именно данный показатель)) в придонной области (рис. 1).

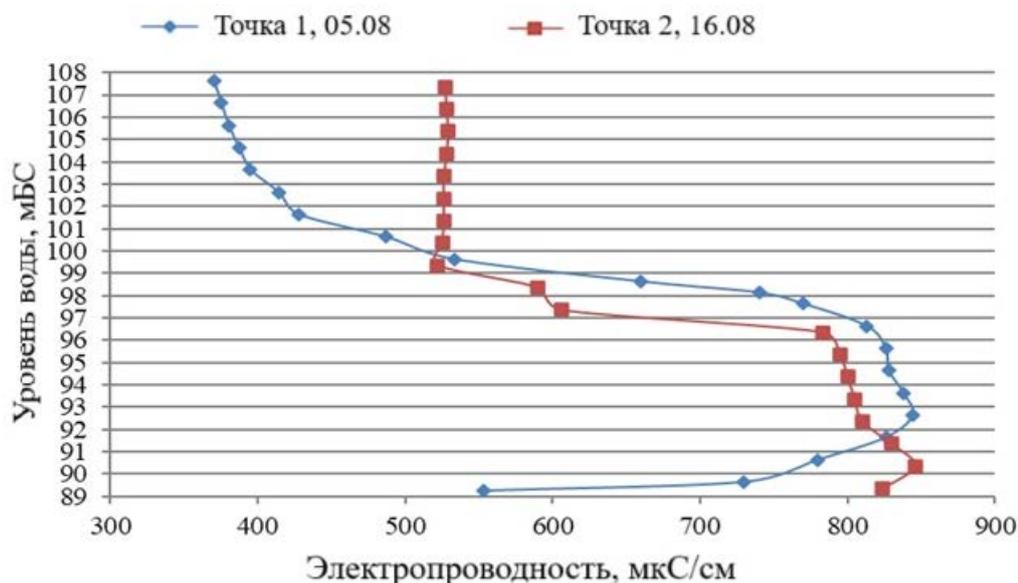


Рис. 1. - Изменение удельной электропроводности воды по глубине в районе ЧОС 5 августа 2016 г. (плотностное число Фруда $Fr_p \sim 0.14$) и 16 августа 2016 г. (плотностное число Фруда $Fr_p \sim 0.21$)

Трехмерное численное моделирование проводилось при помощи метода конечных объемов. Задача решалась для реальной геометрии русла вблизи места слияния рек Чусовая и Сылва, с учетом морфологии дна, измеренной в 2016 году. Математическое моделирование было направлено на воспроизведение эффекта, обнаруженного в наблюдениях и показанного на рис. 1, а именно, наблюдаемого в жаркий летний период, не характерного для других сезонов года, особого распределения минерализации воды по глубине водного объекта, при котором в придонной области регистрируется водные массы с меньшей минерализацией, чем в средней по глубине части водного объекта.

Численное моделирование проводилось для уровня воды в Камском водохранилище 108.4 м, расхода воды по р. Чусовой – 33.9 м³/с, минерализации воды 175 мг/л (удельной электропроводности воды 340 мксим), температуры водной поверхности – $T_c=24^\circ\text{C}$. Расход воды по р. Сылва принимался равным 43.6 м³/с, минерализация 425 мг/л (удельная электропроводность воды 870 мксим), температура водной поверхности $T_s=25^\circ\text{C}$.

Нагрев водной поверхности приводит к формированию устойчивой плотностной стратификации, поскольку менее нагретые, а соответственно более плотные водные массы расположены вблизи дна. Наличие разности минерализаций вод сливающихся рек также приводит к формированию плотностной стратификации вблизи места слияния, данный эффект был детально описан в работе [2].

Проведенные расчеты показали, что, когда имеется существенная неравномерность распределения температуры воды по глубине, в зоне ниже слияния $\sim 10^\circ\text{C}$, максимальная минерализация воды наблюдается на расстоянии от дна около трех метров. Рис. 2. Как видно, вблизи дна минерализация воды меньше, чем на расстоянии 3 метра от дна.

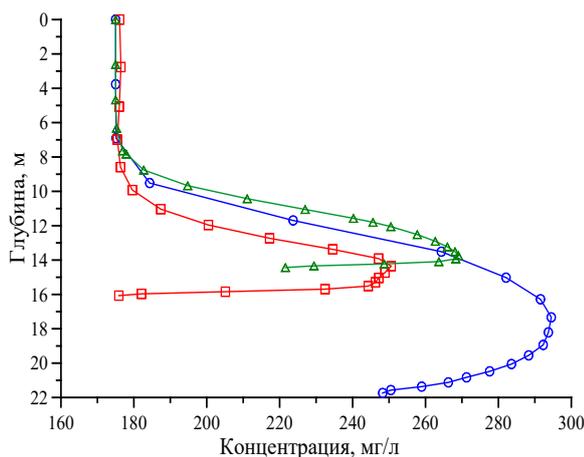


Рис. 2. - Распределения примеси по глубине вблизи водозабора на расстояниях 10 м (черная линия), 100 м (зеленая линия) и 200 м (красная линия) от берега.

В отсутствие температурной неоднородности распределение минерализации характеризуется скачком плотности, при этом максимальное значение концентрации примеси наблюдается непосредственно в придонной области (черные линии на рис. 3). Если же отсутствует влияние минерализации воды на ее плотность (случай пассивной примеси), но есть температурная неоднородность, то скачка плотности не наблюдается, концентрация распределена практически равномерно (серые линии на рис. 3).

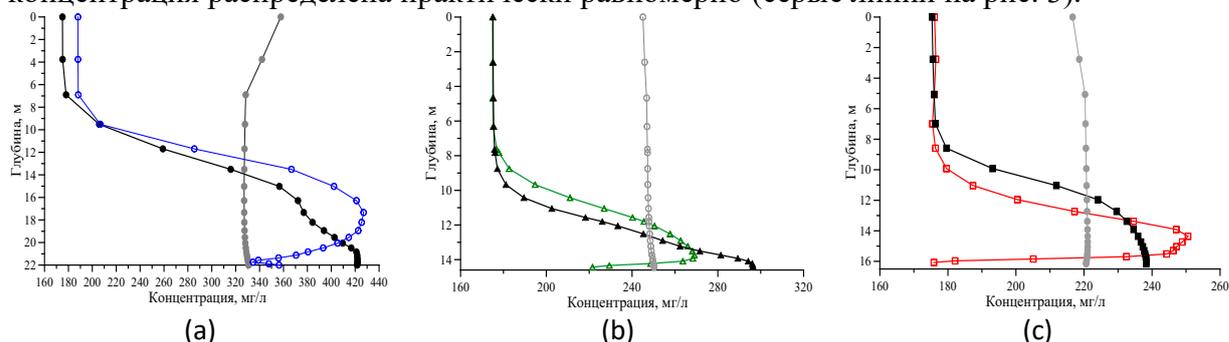


Рис. 3. - Распределения примеси по глубине вблизи водозабора на расстояниях 10 м (а), 100 м (б) и 200 м (в) от берега. Черные линии соответствуют изотермическому случаю, серые линии — случаю пассивной примеси, цветные линии (синие, зеленые, красные) аналогичны рис. 2.

Результаты исследований наглядно подтверждают, что для получения объективной оценки волновых структур, возникающих при слиянии рек со значительно различающимися плотностями, необходимо учитывать неоднородность как минерализации, так и температуры вод.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.5.

Литература

1. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Y.N., Bogomolov A.V. Coherent Structures at the Interface between Water Masses of Confluent Rivers // Water. 2022. Vol. 14. 1308. <https://doi.org/10.3390/w14081308>
2. Lyubimova T., Lepikhin A., Konovalov V., Parshakova Ya., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // J. Hydrol. 2014. Vol. 508. P. 328-342.

НЕФИКОВСКИЙ ТРАНСПОРТ ПАССИВНЫХ ЧАСТИЦ В СТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ ПОТОКАХ

Марышев Б.С., Клименко Л.С.

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

Транспорт примеси через пористую среду осложнен взаимодействием примеси и потока с твердым скелетом среды. Экспериментальные данные показывают, что в пористой среде наблюдается аномальная диффузия примеси, чаще всего субдиффузия. Эти эксперименты привели к созданию фрактальной модели мобильно-немобильной среды (fMIM) [1] – основанной на предположении о специфическом распределении случайных времен задержки частиц средой. Эта модель имеет хорошее согласие с большинством экспериментальных работ, однако природа такого распределения в полной мере не ясна.

В данной работе рассматривается возможность описания наблюдаемых эффектов аномального транспорта за счет вязкого взаимодействия потока со структурой среды. Так при взаимодействии внешнего потока со сложной структурой среды образуются мелкие вихри. Движение по огибающей таких вихрей будет бесконечно долгим. При наличии диффузии частицы примеси могут попадать внутрь вихря тем самым иммобилизуясь. Что приводит к замедлению транспортного процесса.

Рассмотрено двумерное периодическое течение, содержащее вихри внутри элементарной ячейки. Показано, что транспорт пассивных частиц в таком потоке носит аномальный характер. Исследовано влияние теплового шума на транспорт частиц.

Исследовано два типа плоских периодических стационарных течений [2], содержащих пару симметричных вихрей (I) или один вихрь (II) в элементарной ячейке. В обоих случаях функция тока может быть представлена в виде:

$$\psi = \frac{\beta}{H}x - \frac{\alpha}{H}y + \phi(x, y), \quad (1)$$

где H – размер элементарной ячейки, α, β – средние скорости потока в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Функция $\phi(x, y)$ может быть найдена как решение уравнения Навье-Стокса со специфической внешней силой. Для рассмотренных случаев она может быть записана как:

$$\begin{aligned} (I): \quad \phi(x, y) &= a \sin kx - a \sin ky, \\ (II): \quad \phi(x, y) &= a \sin(kx) \cos(ky) - a \sin(kx) - a \cos(ky), \end{aligned} \quad (2)$$

где $k = 2\pi / H$ – волновое число решения, a – амплитуда модуляции потока. При достижении амплитудой некоторого критического значения $a \geq a_c$ течение содержит вихри. Критическое значения определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} (I): \quad a_c &= \frac{\sqrt{\alpha^2 \beta^2 + k^2 \max(\alpha^2, \beta^2)}}{k\sqrt{\alpha^2 + k^2}} \\ (II): \quad a_c &= \frac{\sqrt{-6(\alpha^2 + \beta^2)(\alpha^2 + 6\alpha\beta + \beta^2)(\alpha^2 - 6\alpha\beta + \beta^2) + 6\sqrt{(\alpha^4 + 14\alpha^2\beta^2 + \beta^4)^3}}}{36k\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (3)$$

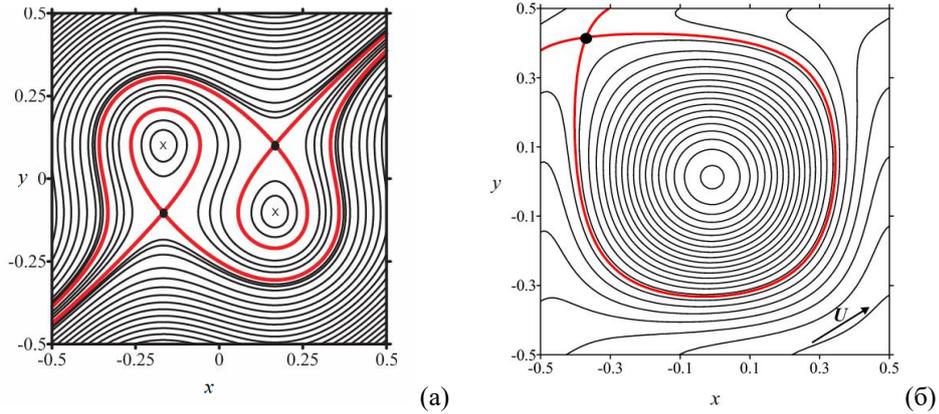


Рис. 1. – Линии тока в элементарной ячейке, при $a = 1 > a_c$, полученные для случая (I) – (а) и (II) – (б), $\alpha = 1$, $\beta = 0.5\sqrt{5} - 0.5$. Для удобства начало координат перенесено в центр ячейки. Красной линией обозначена огибающая вихрей, жирными точками – точки стагнации.

Рассмотрен транспорт ансамбля пассивных частиц на плоскости, покрытой такими элементарными ячейками. Поскольку течение периодически, то проход частицы через ячейку может быть описан в терминах специального потока [3]. Для описания этой техники рассмотрим дрейф частицы через элементарную ячейку, от левой границы ($x = -0.5$) к правой ($x = 0.5$). Очевидно, что координата «выхода» (Y) частицы и время (T), затраченное на преодоление одной ячейки является функцией координаты «входа» (y_0) в ячейку. Учет гауссового теплового шума (интенсивностью D) приводит к необходимости рассматривать ансамбль частиц с одинаковым значением y_0 . В этом случае функции $Y(y_0)$ и $T(y_0)$ определяются как средние по рассматриваемому ансамблю. Специальный поток представляет собой отображение:

$$\begin{aligned} x_n = i - 0.5, \quad y_n = y_0 + \sum_{m=0}^{n-1} Y(z_m), \quad t_n = \sum_{m=0}^{n-1} T(z_m), \\ z_m = -0.5 + |Y(z_{m-1}) + 0.5|, \quad z_0 = y_0. \end{aligned} \quad (4)$$

где $(x = -0.5, y_0)$ – начальное положение частицы, (x_n, y_n) – конечное после прохождения n ячеек вдоль оси x , а t_n – затраченное на это время. Учет шума опять же предполагает расчет для ансамбля частиц с модифицированным специальным потоком, а именно:

$$\begin{aligned} Y(z_m) \rightarrow Y(z_m) + g_m \sqrt{2D_Y(z_m)}, \\ T(z_m) \rightarrow T(z_m) + f_m \sqrt{2D_T(z_m)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где f_m, g_m – независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону, а D_Y, D_T – дисперсии координаты выхода и времени прохождения одной ячейки. Расчет координаты и времени частицы методом специального потока существенно экономит расчетное время и позволяет рассматривать ансамбли состоящие из нескольких миллионов частиц и длинах реализации соответствующих проходу $n \sim 10^7 \div 10^9$ ячеек. Так на Рис.2а представлено зависимость стандартного отклонения по координате (σ) от времени для ансамбля состоящего из 10^7 частиц. На основе анализа подобных зависимостей для различных интенсивностей шума (D), было выяснено: (1) что для достаточно малых времен транспорт носит субдиффузионный характер, т.е. стандартное

отклонение растет медленнее, чем это было бы обусловлено нормальным диффузионным процессом ($\sigma \sim t^{0.5}$). (2) В пределе больших времен всегда наблюдается нормальный диффузионный процесс. (3) Показатель роста увеличивается, а время, в течении которого наблюдается субдиффузия, сокращается, с ростом интенсивности шума. Зависимость показателя роста от интенсивности шума приведена на Рис. 2б. Хотя субдиффузия наблюдается лишь в течении некоторого промежутка времени, иногда этот промежуток может быть достаточно длинным (соответствующим прохождению нескольких тысяч элементарных ячеек), а предел «больших времен» может быть недостижим в рамках конкретного эксперимента.

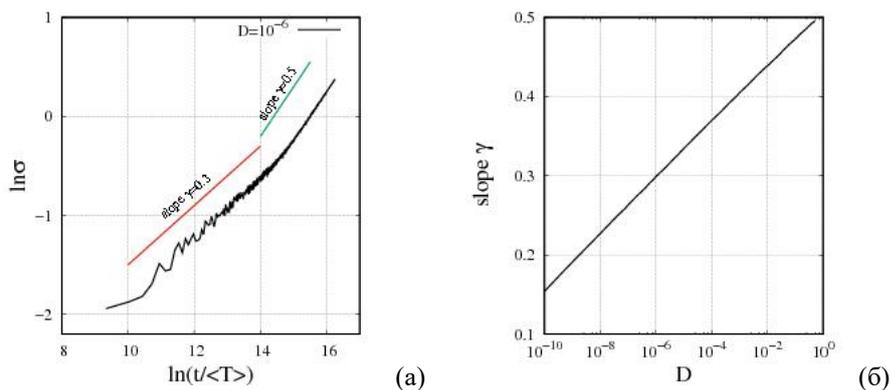


Рис. 2. - зависимость стандартного отклонения $\sigma \sim t^\gamma$ от времени (а) для $D = 10^{-6}$, и зависимость показателя степени γ роста от интенсивности (б) шума D для: $\alpha = 1$, $\beta = 0.5\sqrt{5} - 0.5$, $a = 1$.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.6.

Литература

1. Schumer, R., Benson, D. A., Meerschaert, M. M., Baeumer, B. Fractal mobile/immobile solute transport // Water Resour. Res. 2003. V. 39. P. 1296. <https://doi.org/10.1029/2003WR002141>
2. Zaks M. A., Pikovsky A. S., Kurths J. Steady viscous flow with fractal power spectrum // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. P. 4338. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.4338>
3. Zaks M. A., Nepomnyashchy A. Subdiffusive and superdiffusive transport in plane steady viscous flows //PNAS. 2019.V. 116. P. 18245-18250. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717225115>

АВТОКОЛЕБАНИЯ В ПРОТОЧНОМ МИКРОКАНАЛЕ ИНДУЦИРОВАННЫЕ КОНЦЕНТРАЦИОННЫМ ЭФФЕКТОМ МАРАНГОНИ

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

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

Автоколебания, которые возникают в диссипативных системах с нелинейной обратной связью, представляют собой незатухающие колебания, поддерживаемые постоянным внешним источником энергии [1]. Динамические системы, моделирующие нестационарные природные явления, также демонстрируют наличие автоколебаний. Характеристики автоколебаний не зависят от изменения начальных условий. Это явление можно встретить в физических, химических, биологических и других системах. В литературе по теории колебаний часто противопоставляют синусоидальные и релаксационные колебания. В первом случае, можно наблюдать симметричные гармонические колебания: система возбуждается и возвращается к исходному состоянию по одному и тому же закону. Во втором случае, генератор релаксации производит сигнал, период осцилляций которого определяется внезапным нелинейным переключением пороговых значений. Таким образом, динамика системы состоит из процессов, протекающих с разными временными масштабами. Так как скорость изменения «быстрых» переменных много больше скорости изменения «медленных» переменных, то траектории таких систем состоят из чередующихся участков медленного дрейфа и быстрых срывов. Отличной моделью, которая объединяет в себе оба вида осцилляций, является модель генератора Ван-дер-Поля [2]. Один вид нестационарного поведения сменяется здесь другим при постепенной вариации единственного параметра, отвечающего за нелинейную диссипацию. Модель показывает, что переход к релаксационным колебаниям происходит при значительном усилении вынуждающей силы, которая приводит к быстрому выводу системы из положения равновесия и медленному возвращению за счет процессов диссипации. Колебательные явления широко распространены и в гидромеханике, в том числе в процессах, где участвуют термо- и концентрационно-капиллярные явления. Как известно, если в гидродинамической системе есть межфазная поверхность жидкость - газ или жидкость - жидкость, то её неоднородный нагрев или присутствие молекул поверхностно-активного вещества (ПАВ) могут приводить к неустойчивости Марангони соответственно теплового или концентрационного типа [3]. Такие колебания интересны с фундаментальной точки зрения, так как представляет класс автоколебаний. Этот эффект может быть использован при проектировании микромиксеров и микрореакторов проточного типа в тех случаях, когда простое диффузионное перемешивание становится мало эффективным [4,5].

В данной работе экспериментально и теоретически исследуется автоколебательный процесс в микроканале с T -образным смесителем, в который поступают два раствора. Смешение жидкостей происходит вблизи пузырька воздуха, имплантированного в главном канале на некотором расстоянии от места разветвления. Пузырь частично перекрывает канал. Показано, что при подаче на вход неоднородного раствора ПАВ может возникнуть концентрационная неустойчивость Марангони на границе раздела жидкость-воздух. Возбуждение концентрационно-капиллярной конвекции приводит к сравнительно быстрой гомогенизации раствора ниже по потоку. Особенностью процесса является то, что он протекает импульсно за счет быстрой активации конвекции,

выравнивания поля концентрации вблизи пузырька и последующего восстановления критического градиента концентрации поперек канала.

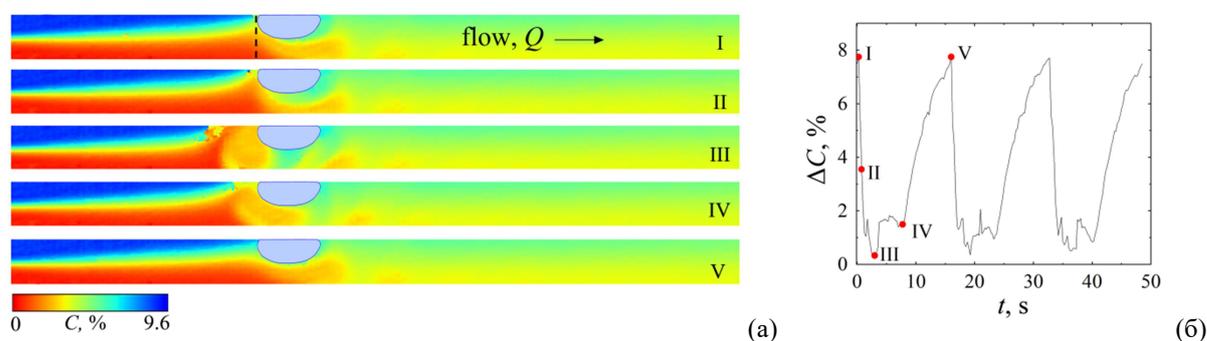


Рис. 1. - Экспериментально измеренная эволюция поля концентрации изопропанола в случае вспышки конвекции Марангони в течение одного периода колебаний. Расход раствора $Q = 0.004$ мл/мин, начальная концентрация раствора изопропанола $C_0 = 9.6\%$, относительный размер пузырька $s = 0.47$ (а); временная зависимость перепада концентрации, измеренного между верхней и нижней границами канала (данное сечение отмечено пунктирной вертикальной линией на фрагменте I на рис. 1а) (б).

Вообще говоря, релаксационные колебания вблизи межфазной поверхности жидкость - газ или жидкость - жидкость в присутствии ПАВ обнаружены достаточно давно (см., например, [3] и ссылки внутри). Неоднородность среды в тех задачах, как правило, создавалась силой тяжести, за счет стратификации раствора ПАВ. В данной работе предлагается принципиально другой механизм релаксации системы на основе стационарного течения жидкости. В новой схеме процесс релаксации не зависит от гравитации точно так же, как и сама неустойчивость Марангони, что позволяет ему одинаково успешно функционировать в условиях гравитации и микрогравитации. Еще одним важным для приложений преимуществом является возможность управления процессом релаксации путем регулирования скорости основного потока. Это принципиально отличает новую конструкцию от осцилляторов с гравитационно-зависимым механизмом релаксации [3], который является медленным и плохо контролируемым извне.

Было обнаружено, что в новой конструкции микрореактора регенерация неоднородности поля ПАВ определяется исключительно геометрией канала и свойствами входящих растворов. В качестве ПАВ использовался изопропанол. Раствор ПАВ подавался через верхний канал, а чистая вода — через нижний. В этом случае начальная стратификация системы препятствовала развитию гравитационных типов неустойчивости. Рисунок 1 показывает характерные изменения поля концентрации изопропанола в рамках одного периода релаксационных колебаний для пузырька. При достижении молекул ПАВ пузырька (фаза I) и постепенном наращивании градиента концентрации вблизи межфазной поверхности (фаза II), в системе вспыхивала конвекция Марангони (фаза III), которая приводила к выравниванию поля и уменьшению градиента почти до нуля (рис. 1б). После исчезновения причины движения жидкости, конвекция прекращалась (фаза IV). После этого начиналась сравнительно длительный процесс релаксации, который заключался в восстановлении неоднородного поля концентрации потоком (фаза V). Рисунок 1б иллюстрирует этот процесс с помощью временной динамики характерной разности концентраций, измеренной прямо перед пузырьком. Численное исследование в рамках разработанной математической модели явления подтвердило вид релаксационных колебаний (рис. 2а) и раскрыло тонкую структуру колебаний. Было показано, что в ходе конвективного импульса часть жидкости забрасывается вверх по каналу, что приводит к двукратному обходу концентрационных языков вокруг пузырька.

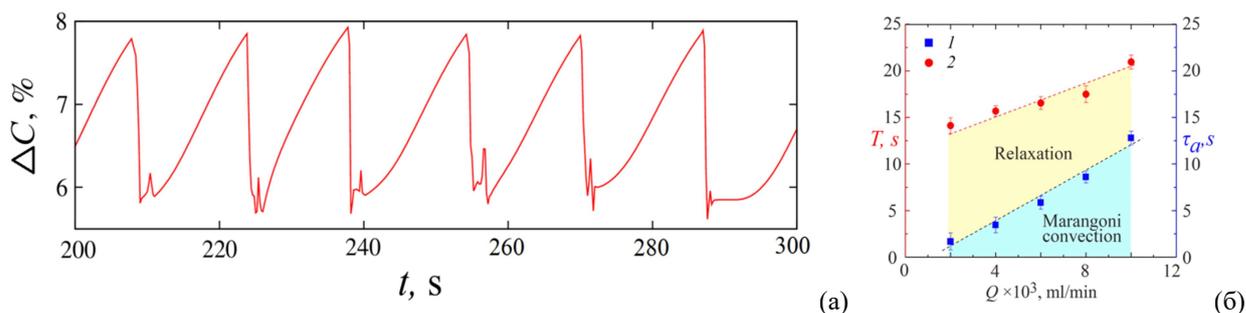


Рис. 2. - Численно полученная временная зависимость разности концентраций при значениях параметров, как в эксперименте: $Q = 0.004$ мл/мин, $C_0 = 9.6\%$ и $s = 0.47$ (а); зависимость периода колебаний (левая шкала) и относительных долей процессов релаксации и конвекции (правая шкала) на периоде колебаний, экспериментально измеренных для разных значений расхода жидкостей (б).

Из-за этой особенности динамического процесса наблюдаемые колебания являлись квазипериодическими либо хаотическими. Возможно, при сверхмалых расходах жидкостей, которые были недостижимы в экспериментах, система входит в колебательный процесс мягко в форме синусоидальных колебаний. Однако, зафиксированный нами экспериментально и численно выход системы из колебательного режима при сравнительно высоких скоростях потока (например, при $Q = 0.012$ мл/мин при указанной выше геометрии пузыря) всегда демонстрировал гистерезис из-за сильно нелинейной формы колебаний. Интересной особенностью системы является обнаруженное увеличение периода колебаний с ростом расхода (рис. 2б). Этот результат не согласуется с общепринятой теорией Рэля - Струхалия для релаксационных колебаний в потоках газов и жидкостей. Как известно, частота колебаний f в таких системах определяется критерием подобия, числом Струхалия $Sh = fL/U$, где L обозначает характерный размер системы, а U — скорость набегающего потока. Здесь естественно ожидать линейный рост частоты колебаний с увеличением скорости потока (число Струхалия обычно $Sh \sim 0.2$). В нашем случае наблюдается обратная зависимость. Дело в том, что рассматриваемая задача имеет внутренние степени свободы, связанные с концентрационно-капиллярным эффектом движения межфазной поверхности в присутствии ПАВ. Поэтому объяснение протекающих процессов не может быть сведено простому динамическому эффекту перемещения элементов жидкости, как это происходит в задаче Рэля - Струхалия.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.7.

Литература

1. Андронов А.А., Вит А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 915 с.
2. van der Pol B., van der Mark J. The heartbeat considered as a relaxation oscillation and electrical model of heart // Phil. Mag. Suppl. 1928. Vol. 6. P. 763-775. <https://doi.org/10.1080/14786441108564652>
3. Mizev A. I., Birikh R. V. Interaction between buoyant and solutocapillary convections induced by a surface-active source placed under the free surface // Eur. Phys. J.: Spec. Top. 2011. Vol. 192. P.145-153. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2011-01369-3>
4. Bratsun D., Kostarev K., Mizev A., Aland S., Mokbel M., Schwarzenberger K., Eckert K. Adaptive micromixer based on the solutocapillary Marangoni effect in a continuous-flow microreactor // Micromachines. 2018. Vol. 9 Art. 600. <https://doi.org/10.3390/mi9110600>
5. Bratsun D.A., Siraev R.R., Pismen L.M., Mosheva E.A., Shmyrov A.V., Mizev A.I. Mixing Enhancement By Gravity-dependent Convection in a Y-shaped Continuous-flow Microreactor // Microgravity Sci. Technol. 2022. Vol. 34. Art. 90. <https://doi.org/10.1007/s12217-022-09994-9>

АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕАКЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ПРОТОЧНОМ МИКРОРЕАКТОРЕ ЗА СЧЕТ ЭФФЕКТА МАРАНГони

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

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

В последние годы взаимодействие процессов реакции-диффузии с гидродинамическими течениями в микрореакторах проточного типа привлекает все больший интерес как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения развития химической технологии [1]. Как известно, фармацевтическое производство нуждается скорее не в больших объемах выхода продукта, а в большей гибкости в перенастройке системы синтеза. Это приводит к проектированию все более миниатюрных реакторов проточного типа. Преимуществами этих новых устройств перед реакторами загрузочного типа включают высокая производительность, простота управления, стабильный расход реагентов и энергии за счет малого объема зоны реактора. Быстро растет число публикаций посвященных положительным результатам химии непрерывного потока, применяемой для одно- или даже многостадийного синтеза целевых соединений в различных реакционных схемах и пространственных масштабах [2]. Из-за небольшого поперечного размера каналов в микрореакторах применение механического перемешивания реагирующих растворов в этих устройствах затруднительно. Поэтому необходимо использовать естественные физические принципы: диффузию и конвекцию. При диффузионном перемешивании необходимо поддерживать более высокие градиенты диффундирующих компонентов и использовать каналы меньшего сечения. В микрожидкостных устройствах этот способ работает хорошо, хотя и требует применения значительного перепада давления на концах установки. Недостатком является существенное снижение выхода продукта. Так как время смешения в микрореакторе зависит от диффузии и не контролируется оператором, то появляется ограничение на тип реакций, которые могут быть реализованы в рамках указанной схемы. Конвекция выглядит более перспективным инструментом управления в проточных реакторах. Мейнстрим включает разработку устройств, которые работают быстрее благодаря вынужденной конвекции. Это достигается за счет специальной конструкции реакторной зоны, в которой возникают конвективные вихри. Такое техническое решение позволяет разработать реакторы для медленных реакций и увеличить выхода продукта. Тем не менее, вынужденная конвекция возникающая из-за специально структурированного внутреннего рельефа реактора слабо контролируется извне, как и диффузия. Большинство технических решений, которые включают методы активного управления с обратной связью, требуют использования внешнего силового поля [3,4].

В последние годы активно проводятся экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных свойств релаксационных колебаний, наблюдаемых вблизи границы раздела воздух-жидкость при неоднородном распределении растворимого поверхностно-активного вещества (ПАВ) [5,6]. В большинстве цитированных работ для поддержания колебаний требовался процесс релаксации связанный с действием силы тяжести. Это не очень удобно для практического использования эффекта при разработке проточных реакторов. В данной работе, мы впервые рассматриваем ситуацию в которой релаксация системы не зависит от силы тяжести и поддерживается за счет самого течения организованном в проточном микрореакторе с T -образным смесителем. Основываясь на новом физическом эффекте, мы предлагаем новый тип конвективного микромиксера,

оперирующий на основе взаимодействия неоднородного потока жидкости с газовым пузырьком, имплантированным в канал. Важной особенностью микромиксера является его управляемость. Мы демонстрируем экспериментально и численно, что манипулирование параметрами расхода реагирующих растворов позволяет активно управлять процессом перемешивания. В качестве тестовой реакции используется схема второго порядка, реакция нейтрализации изомасляной кислоты гидроксидом натрия. Исследованы различные режимы работы микромиксера, структура течения, проведены измерения степени перемешивания.

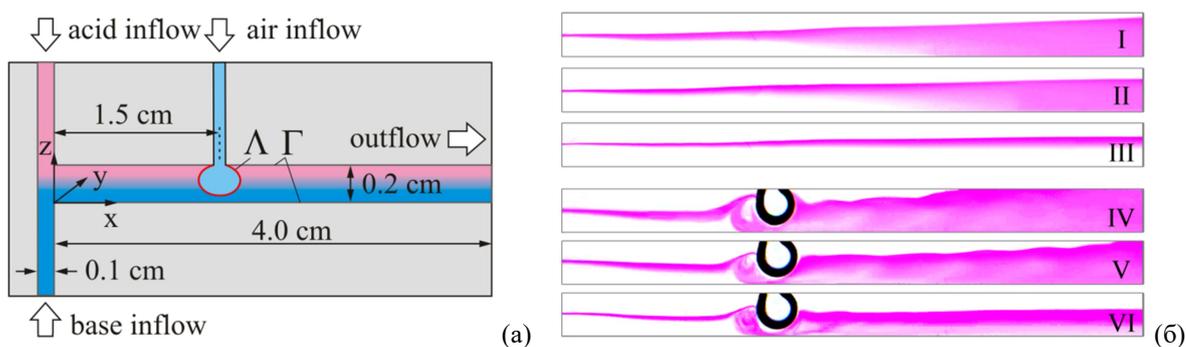


Рис. 1. - Схема микрореактора проточного типа с имплантированным воздушным пузырьком (а); Экспериментально измеренные поля концентрации фенолфталеина для случая диффузионного (I-III) и конвективного (IV-VI) смешения. Расход Q , $\text{см}^3/\text{мин}$, равен: I,IV - 0.008; II,V - 0.010; III,VI - 0.028 (б).

Схема устройства микрореактора со встроенным смесителем Марангони приведена на рис. 1а. Раствор изомасляной кислоты подавался через верхний канал, в то время как раствор NaOH поступал через нижний канал. Размер пузыря и расстояние от него до входа в канал подбирались таким образом, чтобы при тех расходах, которые рассматривались, диффузия не успевала бы сгладить градиенты концентраций. Кислота и её соль являются ПАВ и влияют на процессы переноса в системе. При достижении молекул ПАВ пузыря и постепенном наращивании градиента концентрации вблизи межфазной поверхности, в системе вспыхивала концентрационная конвекция Марангони, которая приводила к выравниванию поля концентрации и уменьшению ее градиента почти до нуля. После исчезновения причины движения жидкости, конвекция начинала затухать и прекращалась. После этого начиналась сравнительно длительный процесс релаксации, который заключался в восстановлении неоднородного поля концентрации потоком через канал. На рисунке 1б представлены поля концентрации индикатора кислотности, что позволяет визуализировать процесс протекания реакции. Кадры I-III показывает процесс смешения в отсутствие пузыря (чисто диффузионный процесс). Кадры IV-VI демонстрируют процесс конвективного смешения при тех же значениях расхода.

Наблюдаемый процесс качественно очень напоминает то, что происходит без химической реакции. Однако есть важное отличие. В случае химически инертной системы с одним ПАВ было обнаружено увеличение периода колебаний с ростом расхода растворов, прокачиваемых через смеситель. Этот результат не согласуется с общепринятой теорией Рэлея - Струхала для релаксационных колебаний в потоках газов и жидкостей. Как известно, частота колебаний f в таких системах определяется критерием подобия, числом Струхала $Sh = fL/U$, где L обозначает характерный размер системы, а U — скорость набегающего потока. В реакционном случае наблюдаемые процессы вполне укладываются в рамки теории Рэлея - Струхала. Этот факт еще ждет своего объяснения.

Численное исследование в рамках разработанной математической модели явления позволило построить карту устойчивости на плоскости расходов через верхний (Q_1) и нижний каналы (Q_2) (рис. 2а). Кроме того, прямое численное моделирование подтвердило вид релаксационных колебаний (рис. 2б), которые реализуются в микрореакторе.

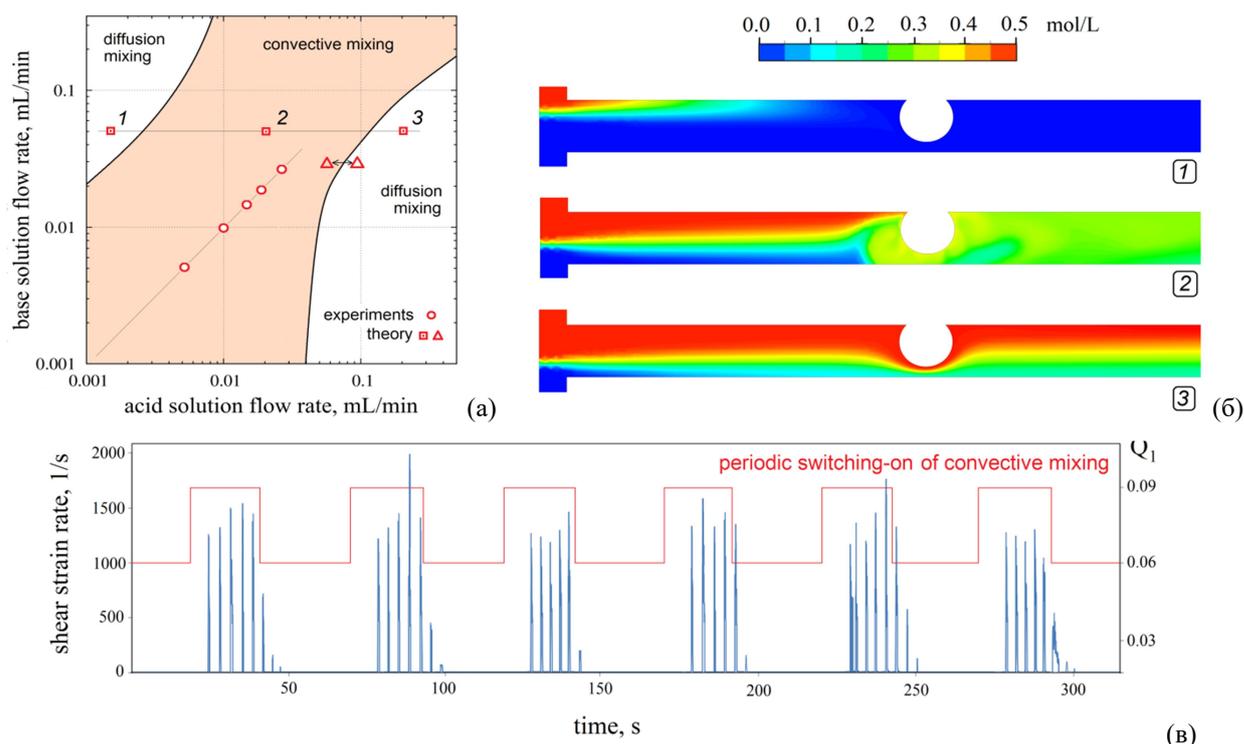


Рис. 2. - Численно полученная карта устойчивости на плоскости расходов через нижний и верхний канал (а); мгновенные поля концентрации кислоты для трех случаев обозначены на карте устойчивости цифрами (б); динамика скорости деформации сдвига во времени при периодическом переключении расхода Q_1 с 0.06 до 0.09 мл/мин и обратно, как показано красной линией. Расход щелочного раствора равен $Q_2 = 0.03$ мл/мин (в).

Рисунок 2в демонстрирует возможность активного управления свойствами системы. При переключении скорости подачи раствора кислоты Q_1 (красная линия) между двумя значениями и фиксированном расходе Q_2 , конвективное перемешивание периодически включается и выключается.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.7.

Литература

1. Reschetilowski W. (Ed.) *Microreactors in Preparative Chemistry*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2013. 352 p. <https://doi.org/10.1002/9783527652891>
2. Mascia S., Heider P.L., Zhang H., et al., End-to-end continuous manufacturing of pharmaceuticals: integrated synthesis, purification, and final dosage formation // *Angewandte Chemie*. 2013. Vol. 125, No. 47, Art. 12585. <https://doi.org/10.1002/anie.201305429>
3. Bratsun D.A., Zyuzgin A.V., Polovinkin K.V., Putin G.F. Active control of fluid equilibrium in a thermosyphon // *Techn. Phys. Lett.* 2008. Vol. 34, No. 8. P. 650-652. <http://doi.org/10.1134/S1063785008080075>
4. Bratsun D.A., Siraev R.R., Pismen L.M., Mosheva E.A., Shmyrov A.V., Mizev A.I. Mixing Enhancement By Gravity-dependent Convection in a Y-shaped Continuous-flow Microreactor // *Microgravity Sci. Technol.* 2022. Vol. 34. Art. 90. <https://doi.org/10.1007/s12217-022-09994-9>
5. Mizev A. I., Birikh R. V. Interaction between buoyant and solutocapillary convections induced by a surface-active source placed under the free surface // *Eur. Phys. J.: Spec. Top.* 2011. Vol. 192. P. 145-153. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2011-01369-3>
6. Bratsun D., Kostarev K., Mizev A., Aland S., Mokbel M., Schwarzenberger K., Eckert K. Adaptive micromixer based on the solutocapillary Marangoni effect in a continuous-flow microreactor // *Micromachines*. 2018. Vol. 9. Art. 600. <https://doi.org/10.3390/mi9110600>

РЕАКЦИЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ В КАПЛЕ, ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫЙ ПАВ ИЗ ЕГО ОДНОРОДНОГО РАСТВОРА

Денисова М.О., Костарев К.Г.

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

Задачи хемогидродинамики в основном связаны с поиском ответов на вопросы о влиянии течений и особенностей тепло/массообмена на динамику химических реакций. Немалая часть этих задач посвящена процессам диффузии в жидких системах с межфазной границей, разделяющей взаимодействующие реагенты. К числу таких систем относятся и капли, окруженные химически активной средой [1]. К сожалению, к настоящему времени объем полученных знаний еще явно недостаточен. Причины хорошо известны – это малые размеры капли, наличие межфазной границы, высокая чувствительность последней к любым внешним воздействиям, наконец, сама сферическая форма капли. Все эти особенности ограничивают применение традиционных приемов для изучения течений, распределений температуры и концентрации в капле. Частично существующих ограничений можно избежать, если использовать капли цилиндрической формы, для создания которой каплю достаточно поместить в параллельный зазор с толщиной меньше ее диаметра. В такой капле массообмен идет только через ее боковую поверхность, а ее плоские торцы позволяют беспрепятственно исследовать этот процесс с помощью оптических методов.

В докладе представлены результаты изучения развития реакции нейтрализации в капле подобной формы, поглощающей недостающий реагент из окружающей однородной смеси. В качестве базовой жидкости капли был выбран водный раствор гидроксида натрия; окружающая среда представляла собой смесь бензола и хлорбензола с уксусной кислотой, причем последняя выполняла роль экстрагируемого реагента с поверхностно-активными свойствами. Продукты реакции – вода и водорастворимый ацетат натрия.

Учитывая специфику задачи, в эксперименте был использован новый метод, в основанный на одновременной визуализации распределений показателя преломления света и степени кислотности растворов исходных реагентов и продуктов реакции в капле. С этой целью были применены, соответственно, интерферометр Физо и рН индикатор «Универсальный», который представлял собой слабо концентрированный раствор ряда рН-индикаторов на водно-спиртовой основе. Индикатор окрашивал в синий цвет водные растворы гидроксида натрия, в зелено-желтый – водные растворы продукта реакции (ацетата натрия) и уксусной кислоты. Индикатор добавлялся в исходный раствор гидроксида натрия непосредственно перед созданием капли.

Так как введение индикатора в каплю даже в малых дозах препятствовало развитию в ней конвекции Марангони, то исследование динамики реакции нейтрализации было проведено в три этапа. На первом этапе структура распределений реагентов в капле и их эволюция были изучены только с помощью рН индикатора. В рамках второго этапа данные о полях концентрации исходных реагентов и продуктов реакции, структуре течений в капле и ее окрестности были получены путем одновременной визуализации распределений реагентов и показателей преломления света с применением интерферометра для капель с рН индикатором. Особенности реакции нейтрализации при возникновении конвекции Марангони были исследованы, используя только интерферометр (третий этап). Индикатор в этом случае в каплю не добавлялся.

Наибольший объем информации об эволюции распределения реагентов в ходе реакции был получен при одновременном использовании интерферометра и рН-

визуализации. На рис. 1 представлена серия интерферограмм, отражающих динамику экстракции уксусной кислоты каплей с развитием реакции нейтрализации при равных исходных концентрациях кислоты и гидроксида натрия $C_{01} = C_0 = 1$ моль/л. Хорошо видно, что формирование зоны релей-тейлоровской неустойчивости, включая характерное падение «пальцев» раствора ацетата натрия, в верхней части капли начиналось практически сразу после формирования капли (рис.1а). Одновременно в нижней части капли возникала застойная зона с высокой стратификацией по плотности, образуемая послойно тройными растворами ацетата и гидроксида натрия (сверху) и ацетата натрия и уксусной кислоты (снизу) (рис. 1б-в). Отметим, что обнаружение послойного строения застойной зоны является результатом использования предложенного нами метода, так как ее верхний слой визуализируется с помощью интерферометра, а нижний – только с помощью рН-индикатора. Еще одним преимуществом этого метода является возможность визуализировать внешнее поле концентрации уксусной кислоты и течения вокруг капли.

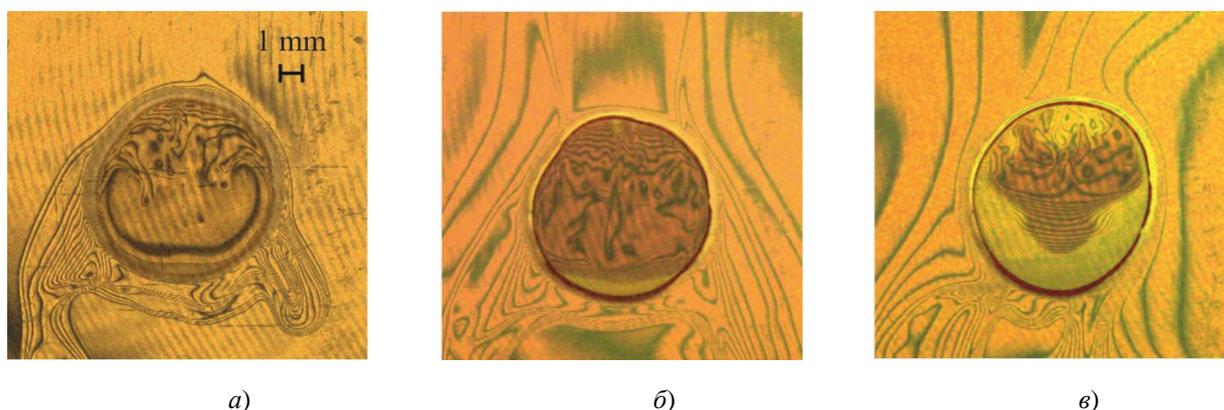


Рис. 1. Эволюция совместного поля показателя преломления света и распределения раствора гидроксида натрия в реагирующей капле, поглощающей уксусную кислоту из смеси бензола и хлорбензола. $C_{01} = C_0 = 1.0$ моль/л. t , с: $a - 36$; $b - 98$; $c - 360$

Помимо визуализации структуры течений и полей концентрации реагентов и продуктов реакции и отслеживания их эволюции со временем, был определен ряд количественных характеристик процесса. В частности, были получены зависимости от времени относительной площади, занимаемой раствором гидроксида натрия в капле, а также высоты застойной зоны, состоящей из растворов ацетата натрия, как характеристик интенсивности реакции в случае применения рН индикатора и без него.

Выводы

Выполненный эксперимент продемонстрировал перспективность предложенного метода исследования развития химических реакций в каплях, позволяя эффективно сочетать преимущества визуализации распределений реагентов с помощью рН-индикаторов и полей показателя преломления света, получаемых с помощью интерферометрии.

Подробно изучена динамика реакции нейтрализации в случае диффузии реакционно-способного ПАВ из его однородной смеси в каплю водного раствора второго реагента. Продemonстрировано, что хотя наличие рН индикатора не меняет кинетику реакции, добавление его раствора – даже в малых концентрациях – может существенно повлиять на эволюцию течений и полей концентраций, возникающих в капле в результате реакции, если один из реагентов обладает поверхностно-активными свойствами. Как следствие, исследование реакции было выполнено как с добавлением рН индикатора, так и без него – соответственно, как в условиях развития только свободно конвективного

движения реакционной смеси, так и в условиях его взаимодействия с конвекцией Марангони.

Несмотря на высокую скорость самой реакции нейтрализации, развитие реакционного процесса в объеме капли даже небольшого (~ 6-7 мм) диаметра занимает довольно много времени (порядка десяти минут и больше). Основной причиной такого медленного распространения реакции служат возникающие продукты реакции, разделяющие реагенты. Медленному развитию реакции содействует и близость плотностей растворов одного из реагентов и продукта реакции, а также тепло, генерируемое в ходе реакции. Последнее в условиях близости плотностей растворов может заметно изменить структуру и динамику течений.

Показано, что в отсутствие капиллярного движения относительная площадь еще непрореагировавшего реагента уменьшается со временем линейно, что позволяет прогнозировать развитие реакции в капле.

Возникновение конвекции Марангони заметно ускоряет реакционный процесс, а концентрационное течение в капле приобретает осциллирующий характер. При этом определяющую роль в возникновении капиллярного движения играют перепады плотности и межфазного натяжения внутри капли из-за выбранного соотношения химических потенциалов жидкостей капли и окружающей среды. Колебательный режим массообмена с окружающей средой сохраняется и после завершения реакции.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.7.

Литература

1. Zhang J., Wang Y., Stevens G.W., Fei W. A state-of-the-art review on single drop study in liquid-liquid extraction: Experiments and simulations // Chin J Chem Eng. 2019. Vol. 27 (12). P. 2857-2875

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СЛУЧАЕ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА

Сухановский А.Н., Васильев А.Ю., Попова Е.Н.

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

Тепловая конвекция является одним из основных источников движения в природных и технологических системах. Базовой системой, которая используется для изучения различных аспектов тепловой конвекции, является слой жидкости, нагреваемый снизу и охлаждаемый сверху, которая известна как конвекция Рэля-Бенара. Задачи управления и интенсификации теплообмена в условиях конвекции Рэля-Бенара привлекают большое внимание из-за многочисленных приложений, особенно для турбулентных режимов [1].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований турбулентного конвективного теплообмена в кубе со сложным рельефом дна, представляющего набор препятствий различного размера (Рис.1а). Использование представленной конфигурации перспективно для интенсификации теплообмена в пассивных теплообменниках. Другой важный аспект касается теплообмена в пограничном атмосферном слое в городской черте. Плотность застройки, размеры зданий могут существенно влиять на теплообмен и, как следствие, распределение температуры в нижнем слое атмосферы [2].

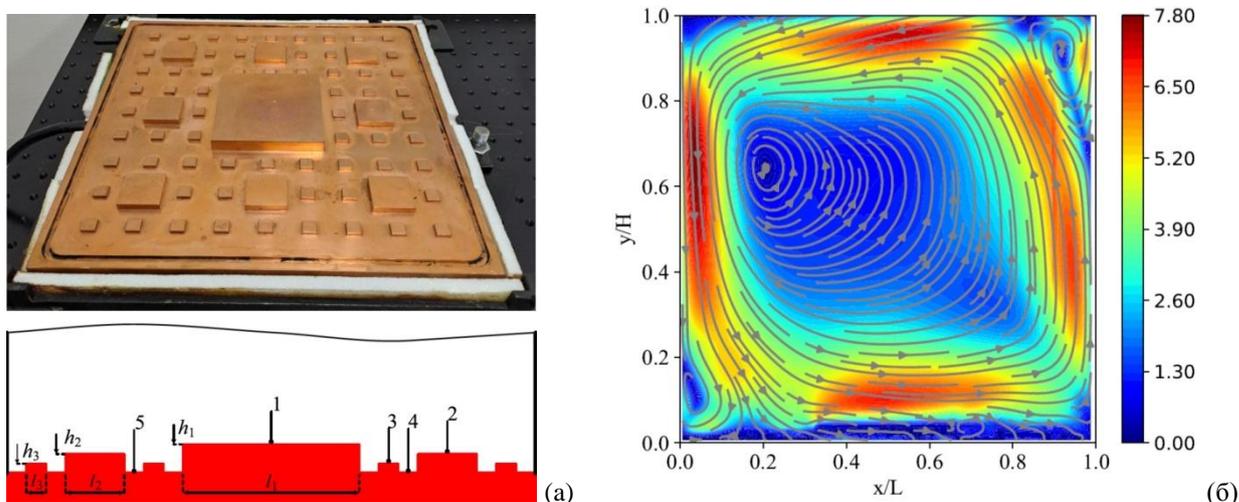


Рис. 1. Медный теплообменник с набором препятствий различного масштаба и схема препятствий с расположением термопар вблизи горячей пластины (а); характерная структура среднего течения, цветом показаны абсолютные значения скорости в мм/с (б)

Турбулентная конвекция в замкнутых полостях характеризуется крупномасштабной циркуляцией в вертикальной плоскости, обеспечиваемой самоорганизацией горячих и холодных тепловых термиком и плюмов (Рис.1б). Результаты экспериментов показали, что для теплообмена с многомасштабным рельефом существуют два различных режима, описываемых степенной зависимостью числа Нуссельта от числа Рэля (Рис.2). Первый режим характеризуется показателем степени равным 0.4, при этом значения числа Нуссельта меньше соответствующих значений в случае плоского дна. Подобное ухудшение теплообмена ранее наблюдалось в численных расчетах [3].

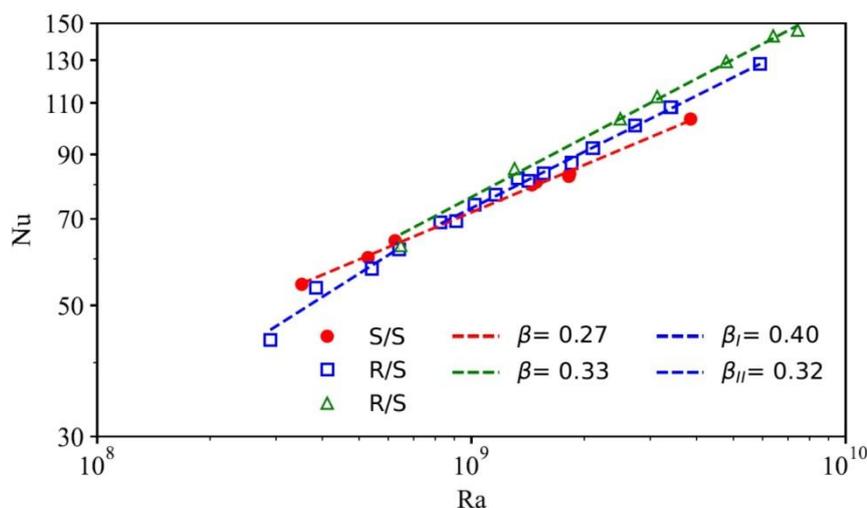


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта Nu от числа Рэлея Ra для различных конфигураций, S/S – плоские горизонтальные поверхности, R/S – нижняя поверхность с препятствиями, верхняя плоская, β – показатель степенной зависимости Nu(Ra), графики построены в логарифмических координатах.

Второй режим характеризуется усилением теплообмена (по сравнению с плоским дном) и показателем степени равным 0.32, который заметно больше, чем в случае плоских границ (0.27). Значительное изменение числа Прандтля (от 6.4 до 62) при использовании силиконового масла не изменяет значения показателя степени для второго режима, но увеличивает значения числа Нуссельта. Термопарные измерения температуры показали, что среднеквадратичные пульсации температуры для сложного рельефа поверхности значительно ниже в первом режиме и выше во втором режиме по сравнению с гладкой поверхностью. Рассмотренная конфигурация хорошо аппроксимирует типичный городской рельеф. Полученные результаты показывают, что городской рельеф может оказывать значительное влияние на теплообмен. В частности, городской остров тепла может характеризоваться усилением теплообмена при высоких значениях числа Рэлея, например, в середине жаркого дня, когда разница температур между поверхностью и окружающим воздухом максимальна, а в ночное время, когда число Рэлея уменьшается, теплообмен может значительно снижаться из-за ослабления конвективных потоков между зданиями.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.11.8.

Литература

1. Xia K. Q. et al. Tuning heat transport via coherent structure manipulation: recent advances in thermal turbulence // National Science Review. 2023. Vol. 10. N.6. P. 1-12.
2. Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area // Urban Climate. 2022. Vol. 43. P. 101177.
3. C Zhang Y. Z. et al. How surface roughness reduces heat transport for small roughness heights in turbulent Rayleigh–Bénard convection // Journal of Fluid Mechanics. 2018. Vol. 836, R2.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИЗАЙНА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ УДАРНОМ УПРОЧНЕНИИ

Вшивков А.Н., Гачегова Е.А., Бартоломей М.Л., Пантелеев И.А., Плехов О.А.

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

Усталость деталей и конструкций остается актуальной задачей в машиностроении. Одним из способов продления усталостного ресурса является создание приповерхностного слоя материала с сжимающими остаточными напряжениями (ОН). Одним из перспективных методов создания ОН является лазерное ударное упрочнение (ЛУУ). В основе метода лежит способность высокоэнергетического лазерного импульса генерировать ударные волны вследствие образования плазмы на поверхности материала с последующим возникновением пластической деформации и остаточными напряжениями на глубине до 2 миллиметров. Этот процесс значительно изменяет усталостные свойства металлических конструкций. В отличие от других лазерных технологий, ЛУУ исключает нагрев материала за счет коротких (десятки наносекунд) импульсов. Использование коротких лазерных импульсов позволяет получать более глубокие поля сжимающих остаточных напряжений по сравнению с традиционными методами, такими как дробеструйная обработка, гидродробеструйная обработка, пластическое выглаживание, ультразвуковой наклеп [1-4]. Для достижения оптимального распределения ОН необходимо точно подобрать параметры воздействия лазерного импульса. Можно провести экспериментальный подбор параметров с последующим определением профиля ОН по глубине. Однако в связи с ограниченностью и трудоемкостью экспериментов, особенно в области достоверного определения остаточных напряжений, широкое распространение получили методы численного моделирования. В работе [5] авторы использовали конечно-элементное моделирование для исследования ОН, вызванных ЛУУ в углеродистой стали при разных параметрах обработки. Другие численные модели были представлены в работах [6,7]. В настоящее время для моделирования лазерной обработки чаще всего используются упрощенные подходы с использованием метода собственных деформаций, так как они позволяют рассчитать большое количество лазерных воздействий за приемлемое время [8].

В работе проводится численное и экспериментальное исследование параметров ЛУУ на дизайн создаваемых ОН в титановом сплаве Вt6. Лазерное ударное упрочнение проводилось с использованием твердотельного Nd:YAG лазера Beamtech SGR-Extra-10. Остаточные напряжения определялись методом сверления отверстия по ГОСТ Р 71321-2024 [9] на системе измерения остаточных напряжений MTS3000 – Restan. При моделировании процесса ЛУУ влияние лазерного импульса учитывалось заданием на поверхности образца функции механического давления, зависящей от времени [10]. Расчет напряженно-деформированного состояния, вызванного этим нагружением, производился в конечно-элементном пакете Ansys. Использовалась модель деформационного упрочнения Джонсона-Кука. Одним из ключевых моментов моделирования лазерного удара является задание соответствующего профиля импульса давления, генерируемого плазмой.

Профиль импульса давления оценивался по профилям скорости свободной поверхности при единичном лазерном ударе на образцах разной толщины (0.5, 0.8, 1 мм). Для измерения профиля скорости использовался фотонный доплеровский измеритель скорости. На рисунке 1 представлены профили скорости и давления для образцов из титанового сплава Вt6 при различной плотности мощности лазерного воздействия.

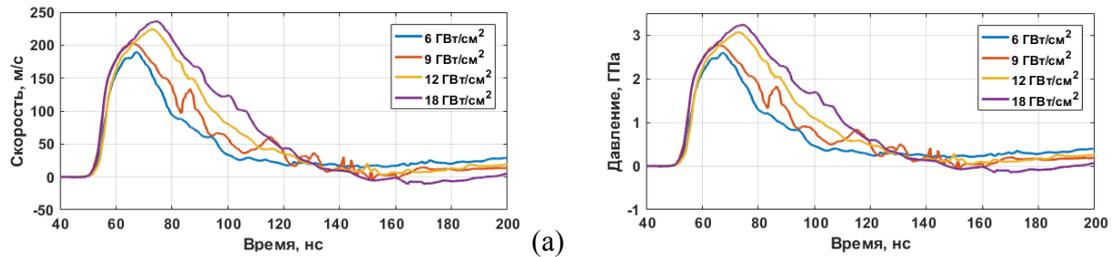


Рис. 1. - Профили скорости свободной поверхности (а) и давления (б) в образцах из титанового сплава Вт6 толщиной 0.8 мм (осреднение по 6-8 измерениям).

Амплитуда давления увеличивается с ростом плотности мощности лазера. Однако рост амплитуды давления от 12 ГВт/см^2 до 19 ГВт/см^2 незначителен. Кроме того, можно отметить, что плотность мощности 6 ГВт/см^2 относительно низкая, что приводит к минимальной пластической деформации титана. На рисунке 2 представлен анализ полученных результатов.

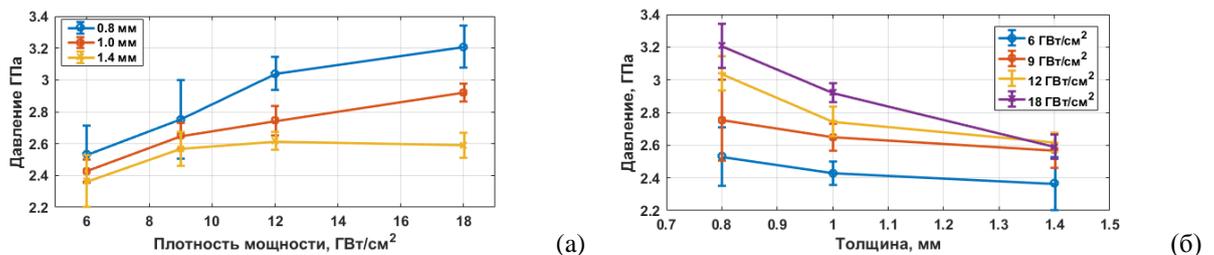


Рис. 2. - Зависимость амплитуды давления от плотности мощности лазерного импульса для образцов различной толщины (а); зависимость амплитуды давления от толщины образцов для различной плотности мощности (б).

При высоких плотностях мощности давление возрастает и наблюдается значительная дисперсия волн. Для образца толщиной 1.4 мм в связи с процессом дисперсии ударной волны сравниваются амплитуды для всех исследованных значений мощности. Экспериментальное значение амплитуды давления на поверхности образца было получено путем экстраполяции результатов эксперимента на образце нулевой толщины (рис. 2б). Важным вопросом для построения математической модели является длительность и форма импульса давления. При длительности лазерного импульса 10 нс длительность импульса давления существенно больше за счёт гидродинамического расширения плазмы, причем по мере проникновения в материал длительность будет увеличиваться за счёт дисперсии волны. В качестве гипотезы представим треугольный импульс давления. Нарастание давления соответствует нагреву плазмы и составляет 10 нс, как и длительность лазерного импульса. Затухание давления составляет порядка 50 нс и соответствует расширению плазмы. Верификация предложенной математической модели проведена путем сравнения результатов расчета профиля ОН для пластин из Вт6 толщиной 3 мм с результатами измерений. Результаты сравнения профилей ОН после одного и двух проходов обработки представлены на рисунке 3. Как видно из рисунка 3, реальные параметры импульса давления в численной модели позволяют получить хорошее соответствие между рассчитанными и экспериментально измеренными профилями остаточных напряжений.

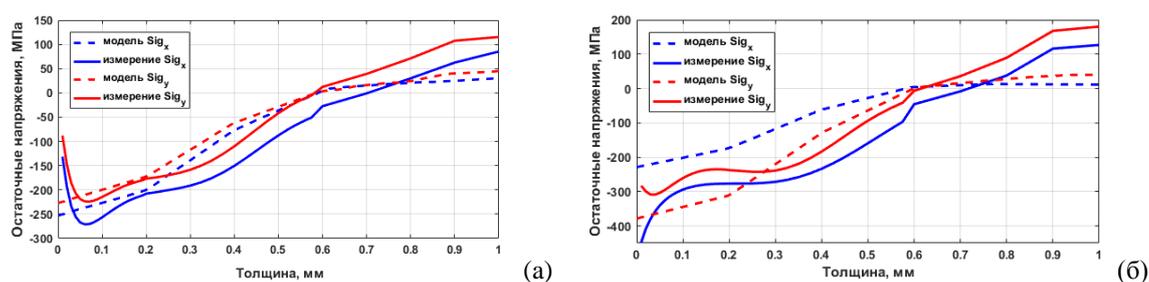


Рис. 3. - Профили остаточных напряжений: (а) после одного прохода, (б) после двух проходов

Анализ результатов измерения профиля скорости свободной поверхности позволяет экспериментально исследовать связь между энергетическими параметрами лазерного излучения и импульсом давления. Измерения показали, что при плотности мощности лазера 6 ГВт/см^2 в титановом образце генерируется почти упругая волна и наблюдается сравнительно небольшая пластическая деформация. На основании измеренных данных о форме импульса давления построена и верифицирована численная модель для расчёта распределения ОН в результате ЛУУ, позволяющая проектировать поле ОН на деталях произвольной геометрии.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.6.1.

Литература

1. Abdulstaar M., Mhaede M., Wollmann M., Wagner L. Investigating the effects of bulk and surface severe plastic deformation on the fatigue, corrosion behaviour and corrosion fatigue of AA5083 // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 254. P. 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.026>.
2. Xie L., Wen. Y., Zhan K., Wang L., Jiang C., Ji, V. Characterization on surface mechanical properties of Ti-6Al-4V after shot peening // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 666. P. 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.119>.
3. Mordiyuk B.N., Karasevskaya O.P., Prokopenko G.I. Structurally induced enhancement in corrosion resistance of Zr-2.5%Nb alloy in saline solution by applying ultrasonic impact peening // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 559. P. 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.125>.
4. Feng Y., Hu S., Wang D., Cui L. Formation of short crack and its effect on fatigue properties of ultrasonic peening treatment 355 steel // *Materials and Design*. 2016. Vol. 89. P. 507–515. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.009>.
5. Warren A.W., Guo Y.B., Chen S.C. Massive parallel laser shock peening: Simulation, analysis, and validation // *International Journal of Fatigue*. 2008. Vol. 30. № 1. P. 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.01.033>.
6. Kostina A., Zhelnin M., Vedemikova A., Bartolomei M., Swaroop S. Finite-element simulation of residual stresses induced by laser shock peening in TC4 samples structurally similar to a turbine blade // *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2024. Vol. 18. № 67. P. 1–11. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.67.01>.
7. Sakhvadze G.H., Pugachev M.S., Sakhvadze G.G. Effect laser shock processing technology on the propagation of cracks in metal // *Modern problems of machine theory*. 2020. № 9. P. 62-65. <https://doi.org/10.26160/2307-342X-2020-9-62-65>.
8. Coratella S., Sticchi M., Toparli M., Fitzpatrick M., Kashaev N. (2015) Application of the eigenstrain approach to predict the residual stress distribution in laser shock peened AA7050-T7451 samples // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 273. № 1. P. 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.026>.
9. ГОСТ Р 71321-2024. Аддитивные технологии. Изделия, полученные методами аддитивных технологий. Определение остаточных напряжений методом сверления. М.: Российский институт стандартизации. 2024.
10. Fabbro R., Fournier J., Ballard P., Devaux D., Virmont J. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry // *J. Appl. Phys*. 1990. Vol. 68. P. 775-784. <https://doi.org/10.1063/1.346783>.

ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ АВИАЦИОННЫХ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Пойлов В.З., Казанцев А.Л., Смирнов С.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет
«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ФИЦ УрО РАН*

Детали авиационных двигателей в процессе эксплуатации подвергаются высокотемпературной газовой коррозии, включающей оксидную и солевую коррозию. Оксидная коррозия проявляется при взаимодействии кислорода воздуха, а солевая коррозия (сульфидная, хлоридная) – при воздействии паров морской воды, содержащих сульфаты и хлориды натрия, магния, с компонентами авиационных жаропрочных никелевых сплавов при температурах 450-900°С. Поскольку при этих температурах соли морской воды подвергаются термогидролизу, то в газовой фазе образуются также пары соляной кислоты, оксиды серы. В продуктах сгорания авиационного керосина также содержатся пары воды, оксиды углерода, следы оксидов серы, частицы пыли, оказывающие абразивное и коррозионное воздействие на детали авиационного двигателя при высоких скоростях газовых потоков (порядка 270 м/с).

К настоящему времени закономерности протекания высокотемпературной газовой коррозии авиационных жаропрочных сплавов в условиях эксплуатации авиационных двигателей, а также воздействие коррозии на остаточные напряжения и прочностные характеристики сплавов мало изучены, хотя имеют большое значение для выбора авиационных сплавов и прогнозирования ресурса их работы. В связи с этим в проекте предусмотрено проведение испытаний стойкости авиационных сплавов с учетом поверхностных остаточных напряжений в соответствии с предлагаемой ниже программой.

Целью исследований является определение коррозионной стойкости жаропрочного никелевого авиационного сплава ЭИ435 и титанового сплава ВТ-6, подвергнутых лазерной проковке (изменение химического и фазового состава в приповерхностной зоне, микроструктуры, глубины коррозионного поражения и изменения остаточных напряжений в приповерхностной зоне в зависимости от количества циклов испытания).

Основными задачами испытаний являются: определение влияния поверхностных остаточных напряжений на коррозионную стойкость рассматриваемых авиационных сплавов и стойкость поверхностных остаточных напряжений к циклическому температурному и химическому воздействию в ходе испытаний, имитирующему воздействию продуктов сгорания авиационного топлива с солевыми примесями на ответственные детали авиационного двигателя в полетных циклах.

Концепция проведения испытаний предусматривает 2 этапа:

1) предварительные испытания высокотемпературной газовой коррозии на лабораторной установке при определенной температуре эксплуатации рассматриваемых сплавов из диапазона 700-1000 °С и составе газовой среды (воздушная смесь с добавлением 75% Na₂SO₄ + 25% NaCl) с оценкой влияния температурно-коррозионного воздействия на остаточные напряжения, химический и фазовый составы на поверхности и в шлифе поперечного сечения образцов;

2) стендовые испытания на установке ПНИПУ, моделирующей работу авиационного двигателя, при заданном температурном и скоростном режимах потока продуктов сгорания авиационного топлива, определенном составе газовой среды с

оценкой влияния температурно-коррозионного воздействия на остаточные напряжения, химический и фазовый составы на поверхности и в шлифе поперечного сечения образцов

Схема лабораторной установка ПНИПУ для исследований высокотемпературной газовой коррозии приведена на рис.1. Квадратные образцы 25х25х3 мм вырезаются из прокованной и не прокованной лазером пластины материала в количестве, обеспечивающем сравнение коррозионной стойкости материала после каждого из последовательных пяти часовых циклов температурно-коррозионного воздействия.

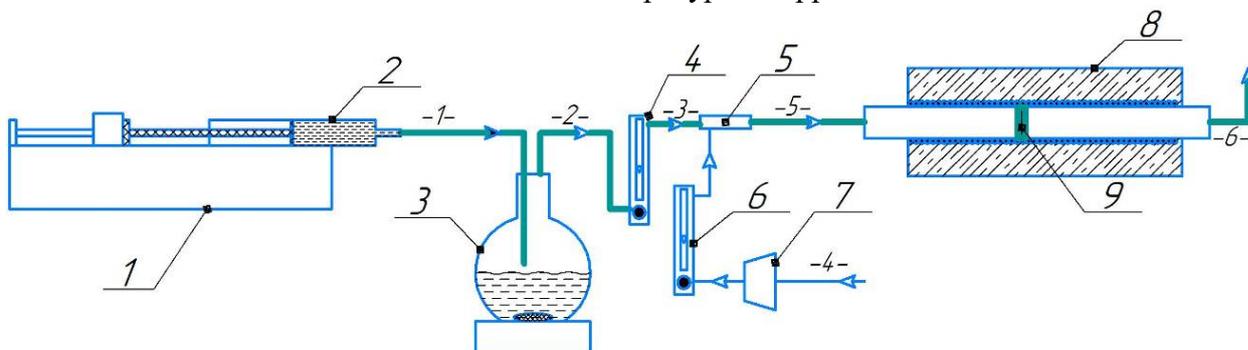


Рис.1. - Схема лабораторной установки. 1 – Шприцевой дозатор, 2 – шприц с $H_2SO_{4(конц)}$, 3 – реактор – генератор SO_2 , 4 – расходомер SO_2 , 5 – узел смешения, 6 – расходомер воздуха, 7 – воздушный компрессор, 8 – трубчатая печь – реактор для изучения коррозии, 9 – исследуемый образец.

Стендовая установка ПНИПУ, разработанная по заказу АО «ОДК-Авиадвигатель», приведена на рис.2. Стендовая установка для исследования высокотемпературной газовой коррозии в условиях, моделирующих работу авиационного двигателя, предназначена для исследования составных частей изделий, относящихся к авиадвигателям за счет нагрева и охлаждения образца с периодическими циклами и внесения коррозионных добавок в твердом, жидком и газообразном состоянии в зону нагрева и с возвратом образца в зону охлаждения.

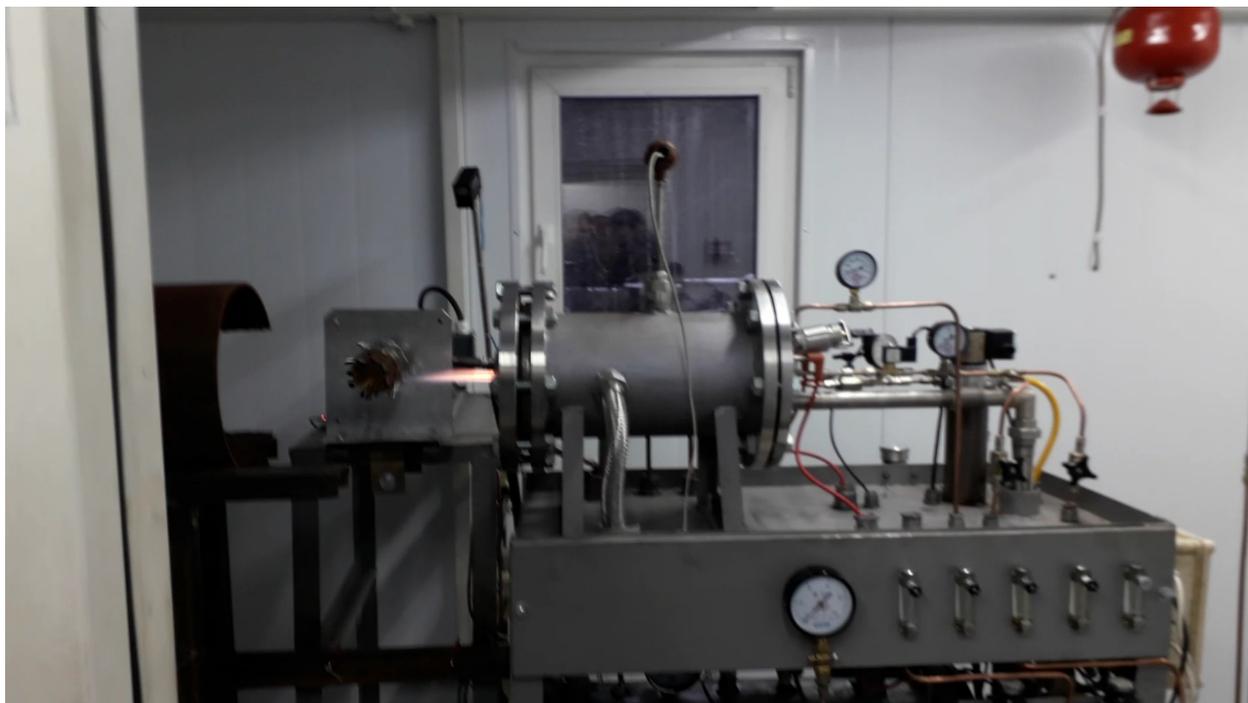


Рис.2. - Стендовая установка для испытаний высокотемпературной газовой коррозии в условиях, моделирующих работу авиационного двигателя.

Стендовая установка включает в себя:

- Системы подачи топлива и воздуха (компрессор, ресивер, мембранный топливный насос, расходомеры);
- Реактор для сжигания керосина или газа;
- Системы подачи загрязнителей (концентрированные растворы морской соли, смеси солей $\text{NaCl}+\text{Na}_2\text{SO}_4$, баллон с SO_2);
- Системы подачи, вращения и охлаждения образцов, измерения температур, давления;
- Автоматические системы, обеспечивающие безопасную эксплуатацию стенда.

Образцы представляют собой пластины 100x25x3 мм, а программа испытания подобна программе испытания на лабораторной установке.

Для изучения термического поведения, химического, фазового состава образцов авиационных сплавов, подвергнутых лазерной проковке и коррозионным испытаниям, разработан приборный и методологический комплексы на базе «Центра наукоёмких химических технологий и физико-химических исследований» ПНИПУ. Он включает станки для резки и изготовления шлифов, прибор для синхронного термического анализа фирмы NETCH (Германия), сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения (СЭМ) «S-3400N» фирмы Хитачи (Япония), приставку для микрорентгеноспектрального анализа к СЭМ фирмы «Брукер» (Германия), рентгеновский дифрактометр XRD-7000 фирмы «Шимадзу», (Япония), оптический микроскоп высокого разрешения «AxioImager» фирмы «Цейсс». Указанные приборы и методики исследований позволяют комплексно и в полном объеме решить поставленные в проекте задачи. Планируемые испытания обеспечат получение данных, достаточных для верификации математической модели высокотемпературной коррозии металлических сплавов с учетом остаточных напряжений, разрабатываемой в настоящем проекте в рамках задачи 1.6.4.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.6.2.

Литература

- El-Awadi G.A., Abdel-Samad S., Elshazly E.S. Hot corrosion behavior of Ni based Inconel 617 and Inconel 738 superalloys // *Applied surface science*. 2016. V. 378. P. 224–230.
- Chang J.X., Wang D., Zhang G. et al. Interaction of Ta and Cr on type-I hot corrosion resistance of single crystal Ni-base superalloys // *Corrosion Science*. 2017. V. 117. P. 35–42.
- Sumner J., Encinas-Oropesa A., Simms N.J., Nicholls J.R. Type II hot corrosion: behavior of CMSX-4 and IN738LC as a function of corrosion environment // *Materials and Corrosion*. 2014. V. 65. P. 188–196.
- Ganesan P., Smith G.D. Oxide scale formation on selected candidate combustor alloys in simulated gas turbine environments // *Journal of Materials Engineering*. 1988. V. 4. No 9. P. 337–343.
- Abedini M., Jahangiri M.R., Karimi P. Oxidation and hot corrosion behaviors of service-exposed and heat-treated gas turbine vanes made of IN939 alloy // *Oxid. Met.* 2018. V. 90. P. 469–484.
- Давыдов М.Н. Сульфидно-оксидная коррозия лопаток газотурбинных установок / А.С. Гишваров, М.Н. Давыдов // *Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей: Межвуз. сб. науч. тр. №20. — Уфа: УГАТУ. 2002. С. 157–169.*
- Zurek Z., Jedlinski J., Kowalski K., Kolarik V., Engel W., Musul J. Sulphidation and oxidation of Ni₂₂Cr₁₀Al₁Y alloy in H₂/H₂S and SO₂ atmosphere at high temperatures // *Journal of Materials Science*. 2000. V. 35. P. 685–692.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ НАВОДОРАЖИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО УДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ И ЕЕ ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ НА УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА

Изюмова А.Ю., Ложкин Д.В., Кудряшев И.С.

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

Одним из способов поверхностного упрочнения материалов является лазерная ударная проковка. При воздействии на поверхность обрабатываемого материала высокомогущным короткоимпульсным лазерным излучением происходит образование плазмы, в результате расширения которой генерируется ударная волна. Ее распространение вызывает пластическое деформирование обрабатываемого материала и формирование поля остаточных напряжений, эффект которого проявляется в повышении усталостной долговечности и коррозионной стойкости материала. Технология лазерной ударной обработки предполагает использование воды в качестве ограничивающего слоя, увеличивающего долю энергии плазмы, направляемую в материал для создания давления. Подача воды организована таким образом, что в зоне обработки она свободно в ламинарном режиме стекает по материалу, образуя слой порядка 0,5 мм. В результате образования плазмы в системе материал-вода вероятно появление свободных диффузионно-подвижных ионов водорода, которые, предположительно, могут внедряться в поверхностный слой материала. Из многочисленных литературных источников [1-4] известен эффект наводораживания и водородной хрупкости материалов, который приводит к ухудшению коррозионных свойств и растрескиванию. В связи с этим, целью данной работы было установление наличия и степени наводораживания обрабатываемого лазерным ударом поверхностного слоя титанового сплава В6 и оценка его влияния на усталостные свойства конструктивно-подобных образцов.

Для установления степени наводораживания поверхности материала после лазерной ударной обработки был подготовлен образец из листа титанового сплава В6 толщиной 3 мм, схематично изображенный на рисунке 1. Лазерная ударная обработка проводилась с энергией лазера 1 Дж, с профилем луча в форме квадрата со стороной 1 мм, без перекрытия отпечатков (стык в стык), плотность мощности лазерного воздействия составляла 10 ГВт/см^2 .

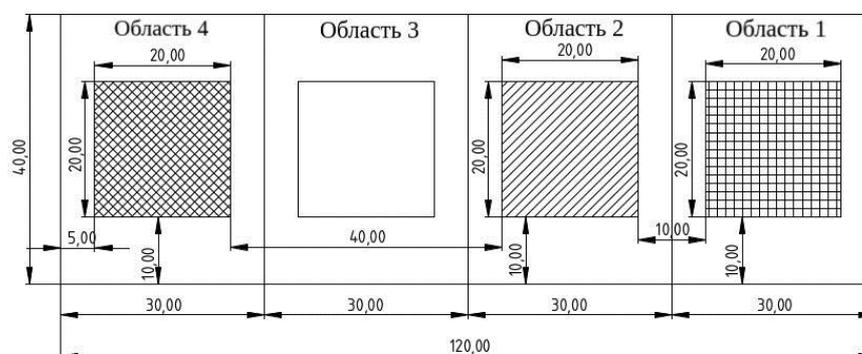


Рис. 1. – Схема образца для исследования эффекта наводораживания поверхности после лазерной ударной обработки (область 1 – обработка лазерным ударом с защитным слоем алюминиевой фольги толщиной 80μm, область 2 – обработка лазерным ударом без защитного слоя, область 3 – без обработки, область 4 – обработка лазерным ударом без защитного слоя с последующей полировкой)

Степень наводороживания исследовалась в Институте проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург) при различных вариантах лазерной ударной обработки – без защитного слоя, с защитным слоем в виде алюминиевой фольги толщиной 80 мкм, без защитного слоя с последующей полировкой поверхности – и на базовом материале без обработки.

Определение концентрации водорода до и после лазерной ударной обработки проводилось методом вакуум-нагрева, реализованном на масс-спектрометрическом анализаторе водорода АВ-1. Материал нагревали в два этапа. На первом этапе образец выдерживали при температуре 600°C. Далее полученный образец помещался в вакуум и повторно нагревался до температуры 750°C. В результате были получены данные, представленные в таблице 1. Оценивались величины Q_{600} – концентрация водорода при 600°C, Q_{750} – концентрация водорода при 750°C и ΣQ – суммарная концентрация (млн⁻¹).

Табл. 1. Результаты исследования степени наводороживания поверхности после обработки

Область обработки	Тип обработки	Q_{600} , ppm	Q_{750} , ppm	ΣQ , ppm
Область 1	Обработка с фольгой	14,13	5,7	19,83
Область 2	Обработка без фольги	11,12	9,56	20,68
Область 3	Базовый материал	14,22	5	19,22
Область 4	Обработка без фольги, после полировки	13,85	6,1	19,95

Показано, что общее содержание водорода не зависит от способа обработки области исследуемого материала. Кроме того, значение концентрации водорода в исследуемых областях пренебрежимо мало по сравнению с концентрациями основных элементов в сплаве Вt6 (Ti-6Al-4V). Незначительная разница в выделении водорода при разных температурах может быть связана с возможными неоднородностями в исследуемом материале. Таким образом, полученные концентрации водорода в обработанных разными способами поверхностях свидетельствуют об отсутствии наводороживания поверхности при лазерной ударной обработке и маловероятности проявления эффекта водородного охрупчивания.

Лазерная ударная обработка плоских образцов толщиной 3 мм из титанового сплава Вt6 с боковым полукруглым надрезом и их усталостные испытания проводились в Институте механики сплошных сред УрО РАН. Геометрия образцов и схема лазерной ударной обработки представлены на рисунке 2. Образцы циклически деформировались при частоте нагружения 10 Гц, коэффициенте асимметрии цикла $R=0,1$ и максимальной приложенной силе в цикле 10 кН.

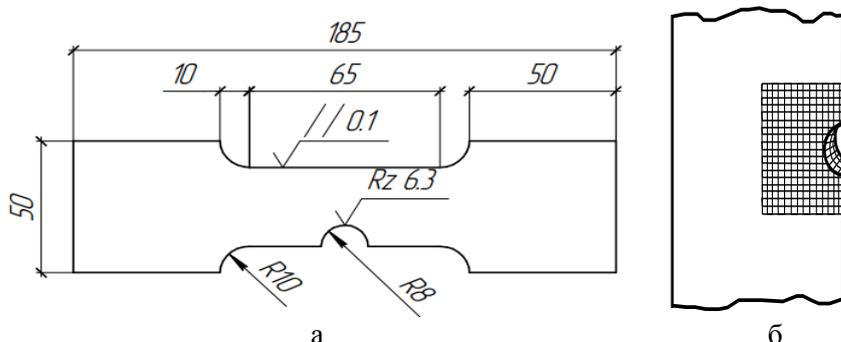


Рис. 2. – Геометрия образцов (а) и схема их лазерной ударной обработки (б)

Всего было испытано 15 образцов, 10 из которых в базовом состоянии, 5 – после лазерной ударной обработки в указанном выше режиме. Результаты усталостных испытаний представлены на диаграмме на рисунке 3. Для базовых образцов усталостная долговечность составила $1,5 \cdot 10^5 \pm 0,4 \cdot 10^5$ циклов, все испытанные базовые образцы разрушились в области бокового надреза. Среди испытанных обработанных образцов: два образца не разрушились при наработке $3,5 \cdot 10^6$ и $2,6 \cdot 10^6$ циклов, один образец разрушился в захвате при количестве циклов $1,6 \cdot 10^6$, еще два разрушились в области концентратора напряжений при наработке $6,0 \cdot 10^5$ и $4,8 \cdot 10^5$ циклов. В результате циклических испытаний было показано увеличение усталостной долговечности образцов после лазерной ударной обработки по сравнению с образцами без обработки.



Рис. 3. – Диаграмма результатов усталостных испытаний

В результате работы показано, что лазерная ударная обработка титанового сплава Вt6 не влияет на концентрацию водорода в поверхностном слое материала и, следовательно, не может вызывать водородное охрупчивание, а также связанное с ним ухудшение усталостных свойств. Усталостные испытания образцов после лазерной ударной обработки показали увеличение усталостной долговечности по сравнению с базовым материалом.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.6.3.

Литература

1. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Metallurgy, 1985. 255 с.
2. Полянский В.А., Беляев А.К., Полянский А.М. и др. Водородная хрупкость как результат поверхностных явлений при деформации металлов // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25. № 3. С. 27–37.
3. Ohaeri E., Eduok U., Szpunar J. Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43. No. 31. P. 14584–14617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene>.
4. Nguyen T.T., Park J., Bae K-O., Baek U.B. Hydrogen-related degradation of fracture properties and altered fracture behavior of Cr–Mo steel used in hydrogen stationary vessels // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 53. P. 1009-1024. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.327>.

МОДЕЛЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУЛЬФИДНО-ОКСИДНОЙ КОРРОЗИИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С УЧЁТОМ НАПРЯЖЕНИЙ

Дудин Д.С., Келлер И.Э., Петухов Д.С.

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

Жаропрочные никелевые сплавы применяются при изготовлении дисков и лопаток турбины высокого давления авиационных и морских газотурбинных двигателей, которые подвергаются воздействию солей из атмосферы и продуктов сгорания топлива. При температурах эксплуатации этих деталей последние испытывают высокотемпературную сульфидно-оксидную коррозию, приводящую к формированию дефектов на поверхности и истощению легирующими элементами поверхностного слоя, что приводит к их преждевременному разрушению. Исследования, в основном, ограничиваются построением по данным экспериментов зависимостей скорости роста коррозионного слоя и качественным выводам на их основе [1-4]. Более глубокие связи и предсказательные возможности способна выявить математическая модель, учитывающая взаимную диффузию (транспорт) компонентов в деформируемой среде с учётом химических реакций и микроструктурных изменений.

На основе анализа существующих работ и химических расчетов выписаны основные реакции сульфидно-оксидной коррозии жаропрочной стали, в котором рассматривается четыре химических реакции: окисление железа, хрома и сульфида хрома, сульфидирование хрома. На первом этапе молекулярный кислород проникает в металл и реагирует с ионами железа и хрома, движущимися навстречу кислороду. После достижения критической толщины коррозионного слоя молекулярная сера проникает в повреждённый поверхностный слой и доходит до границы металл-оксид, где начинает реагировать с хромом и проникать вглубь металла, стимулируя взаимную диффузию и развитие сульфидного слоя. Продолжающееся наращивание оксидных слоёв вместе с окислением сульфида хрома освобождает серу для дальнейшего проникновения вглубь металла, из-за чего присутствие серы в оксидных слоях не наблюдается. Рассматриваются четыре химических реакции, в которых фигурируют диффундирующие реагенты Fe , Cr , O_2 , S_2 и неподвижные продукты Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Cr_2S_3 .

Описанный механизм учтен в формулировке связанной модели процессов взаимной диффузии и химических реакций в упруго деформируемой среде. Она позволяет описывать формирование слоистой структуры корродирующего поверхностного слоя, наблюдаемой экспериментально. Для описания транспорта компонент металлического сплава к коррозионной зоне разработан комбинированный подход к разложению диффузионного и деформационного движения, сочетающий использование маркерной диффузионной системы отсчёта и материальной конвективной скорости для описания связанных процессов взаимной диффузии и упруговязкого деформирования, обладающий определенными преимуществами [5]. На основе термодинамики сплошной среды получена система балансовых уравнений механики и вещества, определяющих уравнений и граничных условий. Численно исследуется одномерная задача для полупространства, демонстрирующая рост коррозионного слоя и обеднение хромом приповерхностного слоя материала с течением времени в атмосфере серы и кислорода. Модель может описывать

обеднение легирующими элементами поверхности двухкомпонентного сплава железа и хрома, а также образование оксидных и сульфидных слоев и формирование остаточных напряжений, а ее результаты (рис. 1) могут быть сопоставлены с экспериментами.

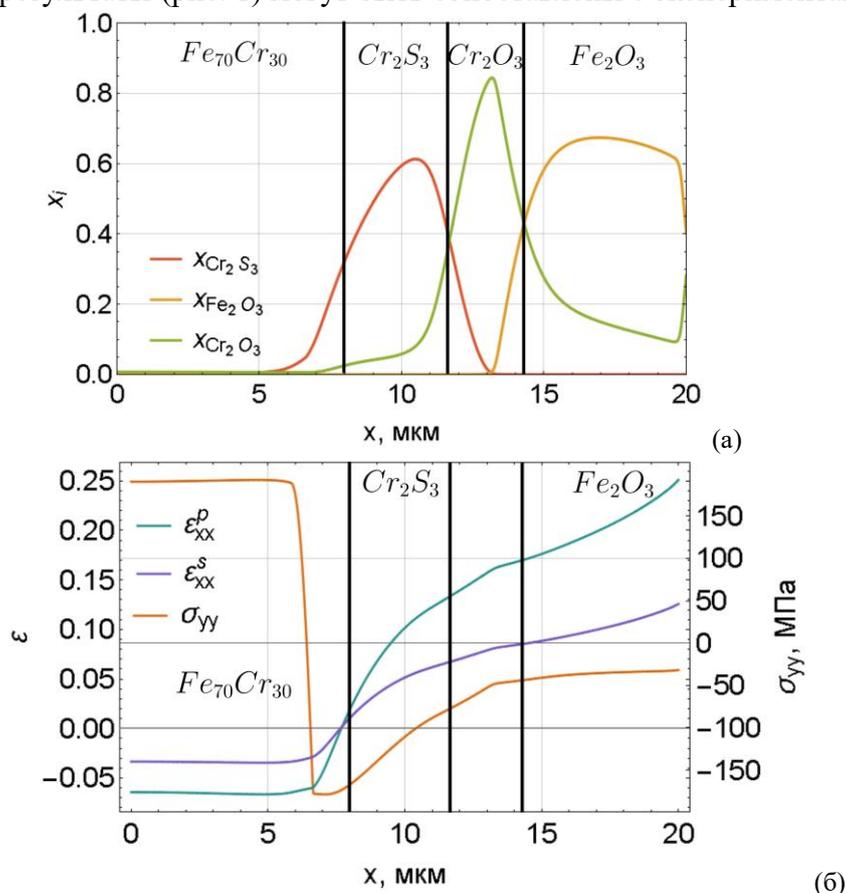


Рис. 1. – Результаты моделирования процесса сульфидно-оксидной коррозии сплава Fe₇₀Cr₃₀: распределение массовых долей продуктов коррозии вдоль толщины (а); профили пластических деформаций, деформаций набухания и напряжений (б)

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.6.4.

Литература

1. Lee W. H., Lin R. Y. Oxidation, sulfidation and hot corrosion of intermetallic compound Fe₃Al at 605°C and 800°C // Mat. Chem. Phys. 1999. Vol. 58. P. 231-242.
2. Sun H., Liu J. Hot corrosion of Fe-Cr-Ni multi-principal element alloys in Na₂SO₄+25%NaCl mixture salts at 700–900°C // Intermetallics. 2024. Vol. 166. P. 108203. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108203>
3. Ning Z., Zhou Q., Liu Z., Li N., Luo Q., Wen D. Effects of imposed stresses on high temperature corrosion behaviour of T91 // Corros. Sci. 2021. Vol. 189. P. 109595. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109595>
4. Саулин Д.В., Усцова В.А., Пойлов В.З., Сквородников П.В., Казанцев А.Л., Смирнов С.А. Высокотемпературная газовая коррозия никелевого сплава // Материаловедение. 2021. Т. 3. С. 42-46. <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2022.4.05>
5. Дудин Д. С., Келлер И. Э. Обзор подходов к формулировке связанных уравнений взаимной диффузии в вязкоупругом теле // Хим. физ. мезоскопия. 2022. Т. 24, № 3. С. 296–311. <https://doi.org/10.15350/17270529.2022.3.24>

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МДО ПОКРЫТИЙ

Торская Е.В., Шкалей И.В., Морозов А.В., Степанов Ф.И., Малышев В.Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

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

Микродуговое оксидирование (МДО) является распространенным способом создания на поверхности алюминиевых сплавов износостойких покрытий, устойчивых к коррозии. Материал покрытий, формируемых методом МДО, по своим характеристикам относится к разряду композиционных керамических материалов. Одним из преимуществ этих покрытий является возможность их модификации путем добавления в электролит различных добавок, либо путем финишной обработки. Модифицирование покрытий направлено на увеличение износостойкости покрытий и уменьшение коэффициента трения. Целью данной работы является изучение механических и трибологических свойств МДО покрытий с комплексным модификатором (порошок наноалмазов и мелкодисперсное серебро) в диапазоне температур от комнатной до 200 °С.

Для проведения исследований были подготовлены образцы размерами Ø50x7 мм из высокопрочного алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg (марки В95), на которых было сформировано покрытие. Покрытия формировали, используя базовый слабощелочной электролит, содержащий 2 г/л КОН + 8 г/л жидкого стекла ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) + 2 г/л гексаметафосфата натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$), в который добавляли различное количество частиц наноалмазов (0, 3, 6, 9 г/л НА) и частиц серебра (0, 3, 6, 9 г/л Ag).

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

Трибологические испытания проводились на трибометре MFT-5000 (Rtec, США) в условиях сухого трения скольжения по схеме «шарик-диск» в соответствии с методикой ASTM G99-23. На шарик диаметром 10 мм из диоксида циркония (> 1220 HV) прикладывалась нормальная нагрузка $F = 10$ Н. Скорость скольжения для всех тестов была равна $V = 0,2$ м/с. Испытания проводились на дорожках трения с номинальными радиусами $R = 12, 16, 19$ и 21 мм и $R = 12, 16$ и 20 мм (при повышенных температурах) на пути трения $S = 1000$ м при температурах: комнатной (~23 °С), 100 и 200 °С. Для каждого меняющегося параметра испытания (температура, нагрузка, материал) было выполнено по 3 теста.

Для обработки результатов индентирования, а также для определения напряжений в покрытии были использованы методы и подходы механики контактного взаимодействия тел с покрытиями [1]. Новизна состояла в использовании результатов профилометрирования керамического шарика для моделирования контакта на разных стадиях фрикционных испытаний, при которых шарик изнашивался.

На рис.1 приведены результаты индентирования покрытий. Построены средние кривые разгрузки для всех образцов с соответствующим доверительным интервалом, а также сопоставление расчетных и экспериментальных кривых индентирования.

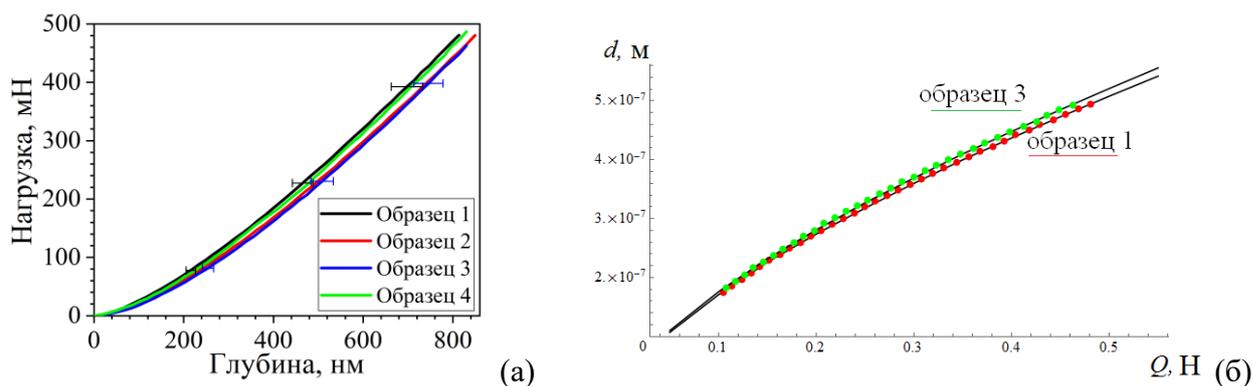


Рис. 1. - Кривые разгрузки (а) для всех образцов и результаты моделирования и эксперимента (б) (сплошные и пунктирные линии соответственно)

Следует отметить, что результаты измерения модуля Юнга и твердости, проведенные по разным методикам, показывают хорошую корреляцию между этими двумя характеристиками. Добавление минимального количества модификаторов приводит к некоторому падению твердости и жесткости покрытия по сравнению с исходным вариантом (без модификации). Увеличение количества модификаторов приводит к тому, что значения этих характеристик растут.

Фрикционные испытания показали, что добавление модификаторов приводит к уменьшению коэффициента трения. Причем чем больше температура, тем больше модификаторов требуется для обеспечения стабильного коэффициента трения. При максимальном количестве модификаторов для всех температур было зафиксировано установившееся значение коэффициента трения около 0,35. Стойкость к разрушению также напрямую связана с количеством модификатора. Образцы с максимальным содержанием модификаторов в электролите (9 г/л НА + 9 г/л Аg) также не разрушались в процессе испытания.

Моделирование фрикционного контакта показало, что при контакте с неизношенным шариком имеют место локальные максимумы растягивающих напряжений на поверхности и на границе раздела с подложкой, которые могут достигать до 300 МПа при нагрузке 10 Н. Эти напряжения достаточно высоки для зарождения микротрещин на порах в поверхностном слое и на интерфейсе. Изнашивание шарика приводит не только к уменьшению значений напряжений, но и к изменению их конфигурации – появляется зона растяжения, однородная по толщине покрытия, что способствует его выкрашиванию.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.6.5.

Литература

1. Торская Е.В. Модели фрикционного взаимодействия тел с покрытиями. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2020. 297 с.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ (КУП) В ОДНОРОДНОМ МАТЕРИАЛЕ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Горячева И.Г., Яковенко А.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

В условиях циклического контактного нагружения деформируемых тел имеет место накопление в них контактно-усталостных повреждений. Одним из способов замедления этого процесса является создание в телах вблизи поверхности нагружения поля остаточных напряжений. В данной работе исследуется влияние остаточных напряжений на распределение внутренних напряжений в упругом теле в условиях трения качения, в частности, максимальных касательных напряжений, которые могут выступать в качестве критерия степени поврежденности приповерхностных слоев материала.

1. Постановка задачи. Рассмотрим качение с постоянными линейной скоростью V , направленной по оси x , и угловой скоростью ω бесконечного упругого цилиндра (1) по упругому основанию (2) из того же материала под действием нормальной силы P и тягового момента (рис. 1). Задача рассматривается в плоской квазистатической постановке. Вводится подвижная система координат (x, z) , связанная с движущимся цилиндром. При малых деформациях контактирующую поверхность цилиндра можно описать функцией $f(x) = x^2/(2R)$, где R – радиус цилиндра. Область контакта представляет собой отрезок длины $2a$.

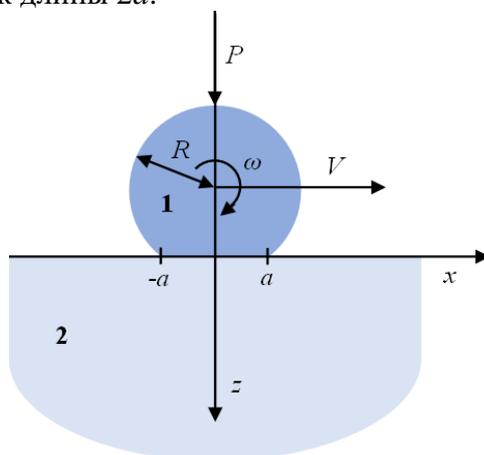


Рис. 1. – Схема качения упругого цилиндра по упругому основанию

В условиях качения с проскальзыванием область контакта разбивается на две подобласти: скольжения, где скорость относительного проскальзывания поверхностей не равна нулю и выполняется закон трения Кулона-Амонтона $|q(x)| = \mu p(x)$ (p и q – нормальные и касательные контактные напряжения, μ – коэффициент трения скольжения), и сцепления, где равна нулю скорость относительного проскальзывания, а касательные напряжения не превосходят их предельного значения, т.е. $|q(x)| \leq \mu p(x)$.

2. Метод решения. В качестве упругого основания рассматривается упругая полуплоскость. При одинаковых модулях Юнга E и коэффициентах Пуассона ν материалов цилиндра и основания распределение касательных напряжений не влияет на распределение контактных давлений, для определения которых можно воспользоваться решением задачи Герца [1]. Распределение касательных напряжений при качении с проскальзыванием упругого цилиндра по основанию из того же материала имеют следующий вид [2]:

$$q(x) = \begin{cases} \frac{\mu E' \sqrt{a^2 - x^2}}{2R}, & -a \leq x \leq c \\ \frac{\mu E'}{2R} \left(\sqrt{a^2 - x^2} - \sqrt{(a-x)(x-c)} \right), & c < x \leq a \end{cases}$$

$$c = a \left(\frac{2\delta R}{\mu a} - 1 \right),$$

где $E' = E / (2(1-\nu^2))$, а $\delta = (\omega R - V) / V$ – величина относительного проскальзывания.

Участок сцепления существует при условии, что $\delta / \mu < a / R$.

Найденные контактные напряжения позволяют определить компоненты тензора напряжений во всех точках упругой полуплоскости ($z \geq 0$), используя принцип суперпозиции, а также аналитические выражения для напряжений, обусловленных только контактным давлением p , представленные в [3].

Предполагается, что в основании также действуют растягивающие или сжимающие остаточные напряжения $\sigma_x^{res}(x, z)$, влияние которых на распределение контактных напряжений считается пренебрежимо малым. Для определённости полагается, что $\sigma_x^{res}(x, z)$ зависят только от расстояния от поверхности, то есть $\sigma_x^{res}(x, z) \equiv \sigma_x^{res}(z)$.

Для расчёта контактно-усталостных повреждений используется макроскопический подход [4], а в качестве критерия накопления повреждений рассматриваются амплитудные значения $\Delta\tau_{\max}$ максимальных касательных напряжений τ_{\max} , распределение которых в случае плоской деформации рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\max}(x, z) = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x(x, z) + \sigma_x^{res}(x, z) - \sigma_z(x, z))^2 + 4\tau_{xz}^2(x, z)}.$$

3. Анализ численных результатов. На рис. 2 представлены изолинии распределения максимальных касательных напряжений, полученные без учёта остаточных напряжений и при действии постоянных растягивающих остаточных напряжений. Напряжения обезразмерены на величину $p_0 = E'a / (2R)$. Результаты показывают, что растягивающие остаточные напряжения приводят к увеличению значений функции $\tau_{\max}(x, z)$, а также к более симметричному ее распределению относительно оси Oz .

На рис. 3 представлены зависимости амплитудных значений максимальных касательных напряжений от расстояния от поверхности, рассчитанные в условиях трения качения при заданных значениях относительного проскальзывания и коэффициента трения скольжения при отсутствии (кривая 3) и наличии постоянных растягивающих (кривая 1) или сжимающих (кривая 2) остаточных напряжений. Из анализа результатов следует, что при заданных условиях контактного взаимодействия растягивающие остаточные напряжения снижают амплитудные значения $\Delta\tau_{\max}$ лишь на небольшой глубине, порядка половины радиуса области контакта. Сжимающие же напряжения практически по всей глубине снижают $\Delta\tau_{\max}$, за исключением подповерхностной области.

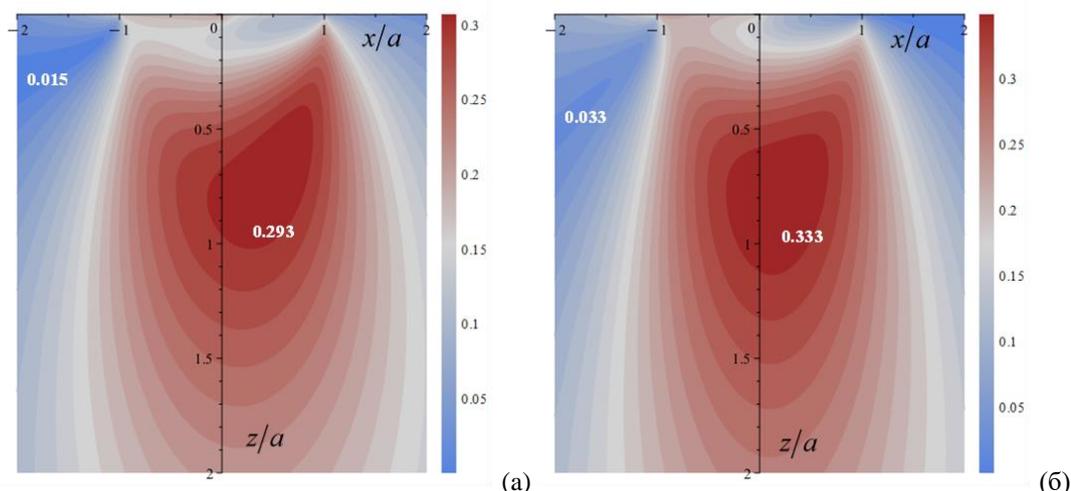


Рис. 2. – Распределение максимальных касательных напряжений τ_{\max}/p_0 в основании под цилиндром при $\sigma_x^{res}(z) \equiv 0$ (а) и $\sigma_x^{res}(z) = 0.1p_0$ (б); $\mu = 0.2$, $\delta = 0.1$

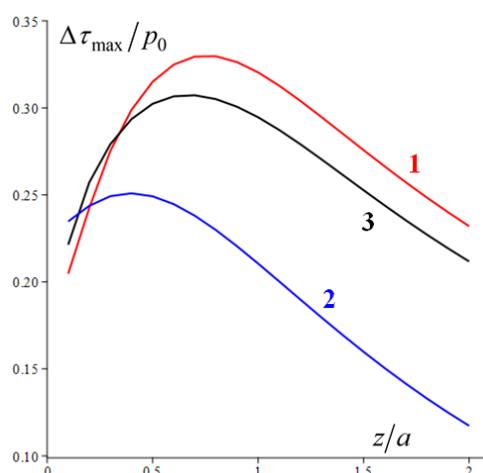


Рис. 3. – Зависимость амплитудных значений $\Delta\tau_{\max}/p_0$ от z/a при $\sigma_x^{res}(z) = 0.1p_0$ (1) $\sigma_x^{res}(z) = -0.1p_0$ (2) и $\sigma_x^{res}(z) \equiv 0$ (3); $\mu = 0.2$, $\delta = 0.1$

4. Выводы. Проведенный анализ показал, что наличие в теле остаточных напряжений приводит к перераспределению поля внутренних напряжений, в том числе максимальных касательных напряжений, влияющих на процесс накопления повреждений в упругом теле в условиях трения качения. Таким образом, при заданных нагрузочно-скоростных параметрах качения с помощью остаточных напряжений можно управлять скоростью накопления контактно-усталостных повреждений в приповерхностных слоях взаимодействующих упругих тел.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.6.6.

Литература

1. Джонсон К. Механика Контактного Взаимодействия. Москва: Мир, 1989. 512 с.
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. McEwen E. Stresses in elastic cylinders in contact along a generatrix (including the effect of tangential friction) // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Vol. 40. 1949. Pp. 454-459.
4. Горячева И.Г. Механика Фрикционного Взаимодействия. Москва: Наука. 2001. 478 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕНИЯ ПОКОЯ ДЛЯ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В КОНТАКТЕ С УПРУГИМ ТЕЛОМ

Маховская Ю.Ю., Цуканов И.Ю., Любичева А.Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

1. Введение. Для повышения функциональных характеристик поверхностей пар трения применяют нанесение геометрической текстуры в зависимости от технологических требований и условий работы пары. Одной из целей нанесения текстуры является управление переходом от трения покоя к трению скольжения поверхностей. Для исследования этого перехода в работе рассмотрено контактирование в режиме частичного проскальзывания, когда величина тангенциальной силы недостаточна для инициирования полного скольжения при заданных величинах нормальной силы и коэффициента трения. В этом случае в областях фактического контакта выступов текстуры с контртелом возникают зоны сцепления и проскальзывания. Предложены постановки задачи, учитывающие разные аспекты проблемы: действие адгезионных сил, влияние кривизны выступов/впадин текстуры и различия в моделях деформируемых тел.

2. Эффект адгезионных сил, действующих по нормали и касательной к контактной поверхности. Текстурированная поверхность моделируется системой выступов, расположенных в углах гексагональной решетки с шагом l и контактируют с упругим полупространством под действием номинального давления p_n и касательного напряжения q_n . (рис. 1,а). Форма выступа описывается функцией $f(r) = Ar^{2n}$, где n – целое число.

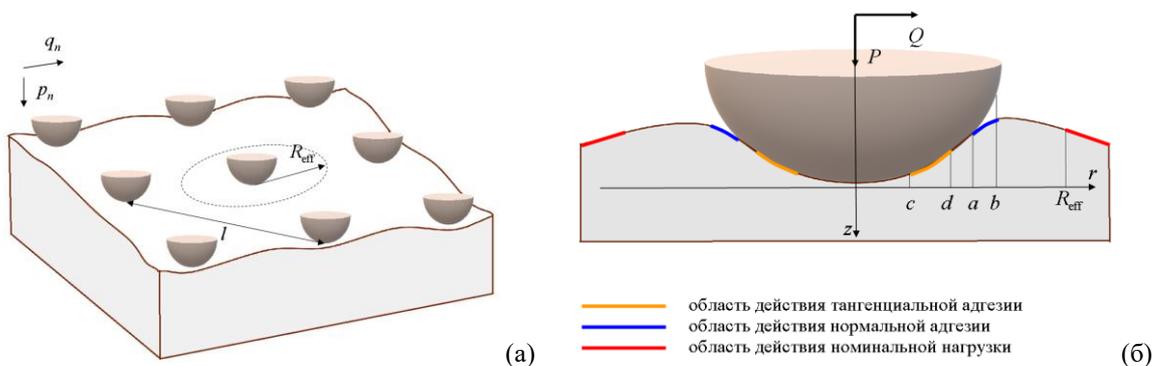


Рис. 1. – Контакт периодической системы выступов и упругого полупространства (а); контакт отдельного выступа с полупространством после применения метода локализации (б)

Каждый выступ контактирует с полупространством по круговой области радиуса a , а в кольцевой области $a < r < b$ действует **нормальная адгезия**, заданная давлением $-p_0$. Внутри области контакта находится круговая область сцепления радиуса c , а в области $c < r < d$ действует **тангенциальная адгезия**, заданная напряжением $-\tau_0$, при этом вне области сцепления действует закон трения Амонтона с коэффициентом трения μ :

$$q = -\mu p \quad (1)$$

Используя метод локализации [1], рассмотрим взаимодействие с полупространством одного выступа, а действие остальных заменим номинальными нагрузками p_n и q_n , действующими вне круга радиуса R_{eff} (рис 1,б). Граничные условия для нормальных и касательных усилий p , q и перемещений w , u имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} w(r) = -f(r) + \delta_z & r \leq a \\ p(r) = -p_0 & a < r \leq b \\ p(r) = 0 & b < r \leq R_{\text{eff}} \\ p(r) = p_n & r > R_{\text{eff}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{ll} u(r) = -\delta_x & r \leq c \\ q(r) = -\tau_0 - \mu p(r) & c < r \leq d \\ q(r) = -\mu p(r) & d < r \leq a \\ q(r) = 0 & a < r \leq R_{\text{eff}} \\ q(r) = \tau_n & r > R_{\text{eff}} \end{array} \right. \quad (2)$$

Нормальная и тангенциальная адгезия действуют в областях, где нормальный и тангенциальный зазор не превышают значений z_0 и x_0 , соответственно:

$$w(b) + f(b) - \delta_z = z_0 \quad -u(d) + \delta_x = x_0 \quad (3)$$

Выполняются условия равновесия:

$$P = 2\pi \int_0^b r p(r) dr = \pi R_{\text{eff}}^2 p_n \quad T = 2\pi \int_0^a r q(r) dr = \pi R_{\text{eff}}^2 q_n \quad (4)$$

В предположении, что упругие постоянные выступов и полупространства одинаковы, решения для нормальных и касательных усилий строятся отдельно. Пример полученных распределений нормальных и касательных поверхностных усилий в окрестности отдельного выступа (при $l = \infty$) приведен на рис. 2, а.

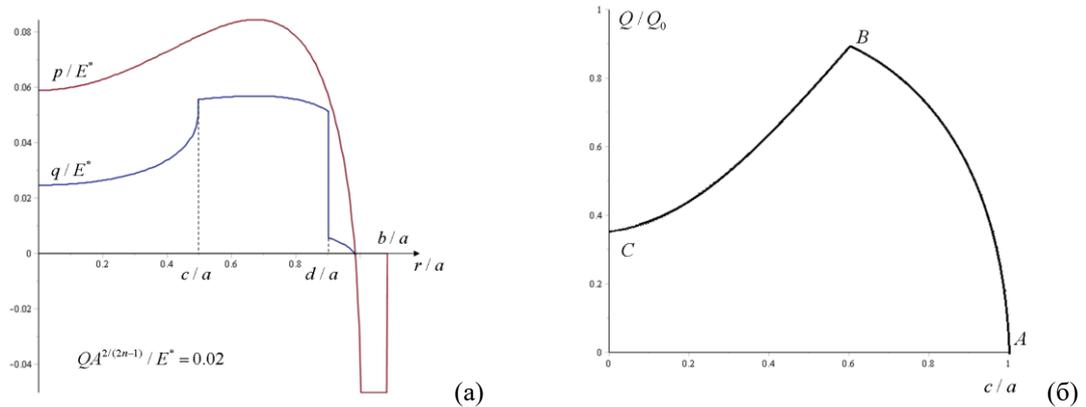


Рис. 2. – Распределение нормальных и касательных усилий по радиальной координате (а); тангенциальная сила, действующая на выступ, в зависимости от радиуса области сцепления (б) при $n=2$, $\mu=0.1$, $z_0 A^{1/(2n-1)} = x_0 A^{1/(2n-1)} = 0.01$, $p_0/E^* = \tau_0/E^* = 0.05$, $PA^{2/(2n-1)}/E^* = 0.01$

Особенностью данной постановки задачи является необратимость разрыва тангенциальной адгезии, которая может быть обусловлена химическим взаимодействием поверхностей, в отличие от нормальной адгезии, связанной с действием потенциальных ван-дер-ваальсовых сил. Увеличение тангенциальной силы Q от нуля (точки A на рис. 2,б) приводит к уменьшению радиуса области сцепления c , а затем к скачкообразному переходу к полному скольжению (точка B). Результаты предсказывают также плавный переход к полному скольжению при уменьшении силы Q (точка C).

3. Эффект кривизны текстурированной поверхности для различных моделей материала. Текстурированная поверхность моделируется периодической функцией вида:

$$f(x) = A \sin^n(\pi x / L) \quad (5)$$

К каждому элементу текстуры – выступу, определенному на одном периоде, приложены нормальная P и касательная Q нагрузки (рис. 3,а). В центре зоны контакта шириной $2a$ находится область сцепления $c_1 < x < c_2$. Предполагается, что действие сил трения в зоне проскальзывания подчиняется закону Амонтона (1).

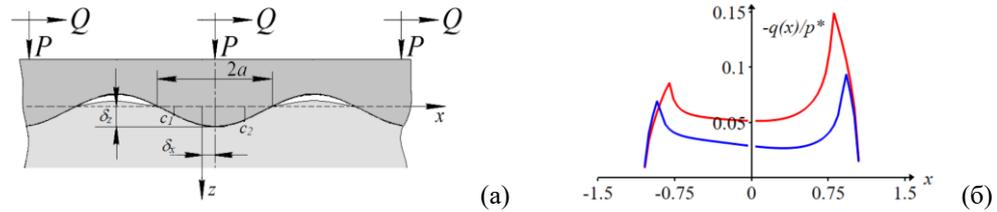


Рис. 3. – Контакт синусоидальной поверхности и упругого тела (а); распределения касательных усилий при $p^* = \pi E^* A/4L$; $2a/L = 1/3$; $A/L = 5 \cdot 10^{-3}$: $c/a = 0.75$ (красная кривая); $c/a = 0.86$ (синяя кривая) (б)

Особенностью постановки задач в этом разделе является отказ от предположения о малости кривизны выступов/впадин, которое часто не выполняется для реальных текстур. С этой целью рассматриваются две модели материала.

Модель упругого основания Ишлинского [2], состоящая из упругих стержней, которые могут не только деформироваться в вертикальном направлении, но и отклоняться от вертикального положения. Горизонтальные u_x и вертикальные u_z перемещения основания связаны с горизонтальными p_x и вертикальными p_z усилиями соотношениями:

$$p_x(x) = k_x u_x(x) \quad p_z(x) = k_z u_z(x) \quad (6)$$

Эта модель позволяет отказаться как от предположения о малости кривизны выступов, так и от предположения об одинаковых упругих характеристиках взаимодействующих тел.

Модель упругой полуплоскости с уточненным условием контакта. Используются интегральные операторы модели сплошной среды для упругой полуплоскости из несжимаемого материала:

$$u_z(x) = \frac{2(1-\nu^2)}{EL} \int_{-a}^a p_z(\xi) \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi(x-\xi)}{L} \right) d\xi \quad u_x(x) = \frac{2(1-\nu^2)}{EL} \int_{-a}^a q_x(\xi) \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi(x-\xi)}{L} \right) d\xi \quad (7)$$

а также условие контакта, учитывающее кривизну выступов/впадин поверхности

$$\sqrt{u_z(x)^2 + u_x(x)^2} = \delta_z - f(x - u_x(x)) \quad (8)$$

Эта модель более точно учитывает свойства материала, в том числе взаимное влияние выступов через упругий материал, по сравнению с моделью Ишлинского.

В обеих моделях нормальная к поверхности и касательная составляющие усилий в области контакта рассчитываются с учетом искривления профиля текстуры:

$$\begin{aligned} x < 0: & \quad p(x) = -p_x(x) \sin(\varphi(x)) + p_z(x) \cos(\varphi(x)) \\ & \quad q(x) = p_x(x) \cos(\varphi(x)) + p_z(x) \sin(\varphi(x)) \\ x > 0: & \quad p(x) = p_x(x) \sin(\varphi(x)) + p_z(x) \cos(\varphi(x)) \\ & \quad q(x) = p_x(x) \cos(\varphi(x)) - p_z(x) \sin(\varphi(x)) \end{aligned} \quad (9)$$

где $\varphi(x)$ – угол между касательной к поверхности в точке x и горизонтальной осью.

Распределения касательных усилий под выступом текстуры для модели упругой полуплоскости с уточненным условием контакта показаны на рис 3, б. Учет кривизны выступов приводит к асимметрии распределения касательных усилий под ними.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.6.7.

Литература

- Goryacheva I., Makhovskaya Y. Discrete Contact Mechanics with Application in Tribology. USA: Elsevier Inc., 2022. 220 p.
- Горячева И.Г. Исследования А.Ю. Ишлинского в области трения качения и их развитие // ПММ. Т. 67. № 4. С. 646-662.

МОДЕЛИ УПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД

Барях А.А., Цаюков А.А., Самоделкина Н.А.

«Горный Институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

Соляные породы относятся к классу геоматериалов, для которых характерно ярко выраженное проявление реологических свойств [1,2,3]. Разработка калийных и соляных месторождений, как правило, осуществляется камерно-столбовой системой с поддержанием вышележащей толщ на междукамерных целиках. Междукамерные целики находятся под постоянной, мало изменяющейся во времени нагрузкой, что обуславливает активизацию процессов ползучести [4]. Небольшая скорость подвигания очистных работ практически исключает проявление в междукамерных целиках этапа неустановившейся ползучести (первичной ползучести). В этой связи наибольший интерес для анализа вызывает стадия установившейся ползучести (вторичной ползучести).

Исследование процесса деформирования крупномасштабных соляных образцов кубической формы при одноосном сжатии [5] позволило выделить критерии разрушения (пластичности) и связанные с ними законы пластического течения, которые наиболее точно одновременно описывают диаграмму их нагружения и зависимости поперечной деформации от продольной. Такими оказались неассоциированный критерий Кулона-Мора [6] и ассоциированный объёмный критерий прочности горных пород [7].

В рамках исследования временных эффектов, проявляющихся при деформировании соляных пород, были проведены лабораторные испытания на ползучесть при одноосном сжатии. Тестирование проходило на малых образцах красного сильвинита (60×30×30 мм). Проявление ползучести образцов исследовалось при различных уровнях нагружения (отношение действующего напряжения σ к пределу прочности на одноосное сжатие σ_c : $p = \sigma/\sigma_c$) [8].

Цель исследований – обобщить упругопластическую модель деформирования образцов соляных пород за счёт включения вязкой составляющей и описать результаты испытаний на ползучесть. В качестве критериев пластичности использовались выделенные по результатам исследований [5]: неассоциированный критерий Кулона-Мора и ассоциированный объёмный критерий.

Временные эффекты в деформационном поведении соляных пород описывались с помощью изотропной вязкопластической модели среды [9,10,11]. Упругий режим деформирования соответствовал линейному закону Гука. Неупругие деформации выражаются как

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \dot{\lambda} \frac{\partial \Psi}{\partial \sigma}, \quad \dot{\lambda} = \begin{cases} f(\sigma, \mathbf{A}, \mathbf{P}), & \Phi(\sigma, \mathbf{A}) > 0, \\ 0, & \Phi(\sigma, \mathbf{A}) \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь Φ и Ψ это функция текучести и пластический потенциал, соответственно, а также наборы внутренних параметров материала: \mathbf{A} (пластических) и \mathbf{P} (вязких).

Решение системы дифференциальных уравнений упруго-вязкопластической модели среды проводилось методом конечных элементов в перемещениях. Калибровка построенной модели деформирования соляных образцов по экспериментальным данным осуществлялась с помощью многовариантного моделирования путём варьирования только параметров \mathbf{P} .

Для построения упруго-вязкопластической модели использовались следующие схемы интегрирования. Глобальное интегрирование по времени реализовано с помощью

автоматической схемы Ньютона-Рафсона с подшагами и контролем ошибки [12]. Локальное интегрирование упруго-вязкопластических соотношений в пределах точки интегрирования конечного элемента – с помощью неявной схемы Эйлера алгоритма обратного отображения [9,10,11].

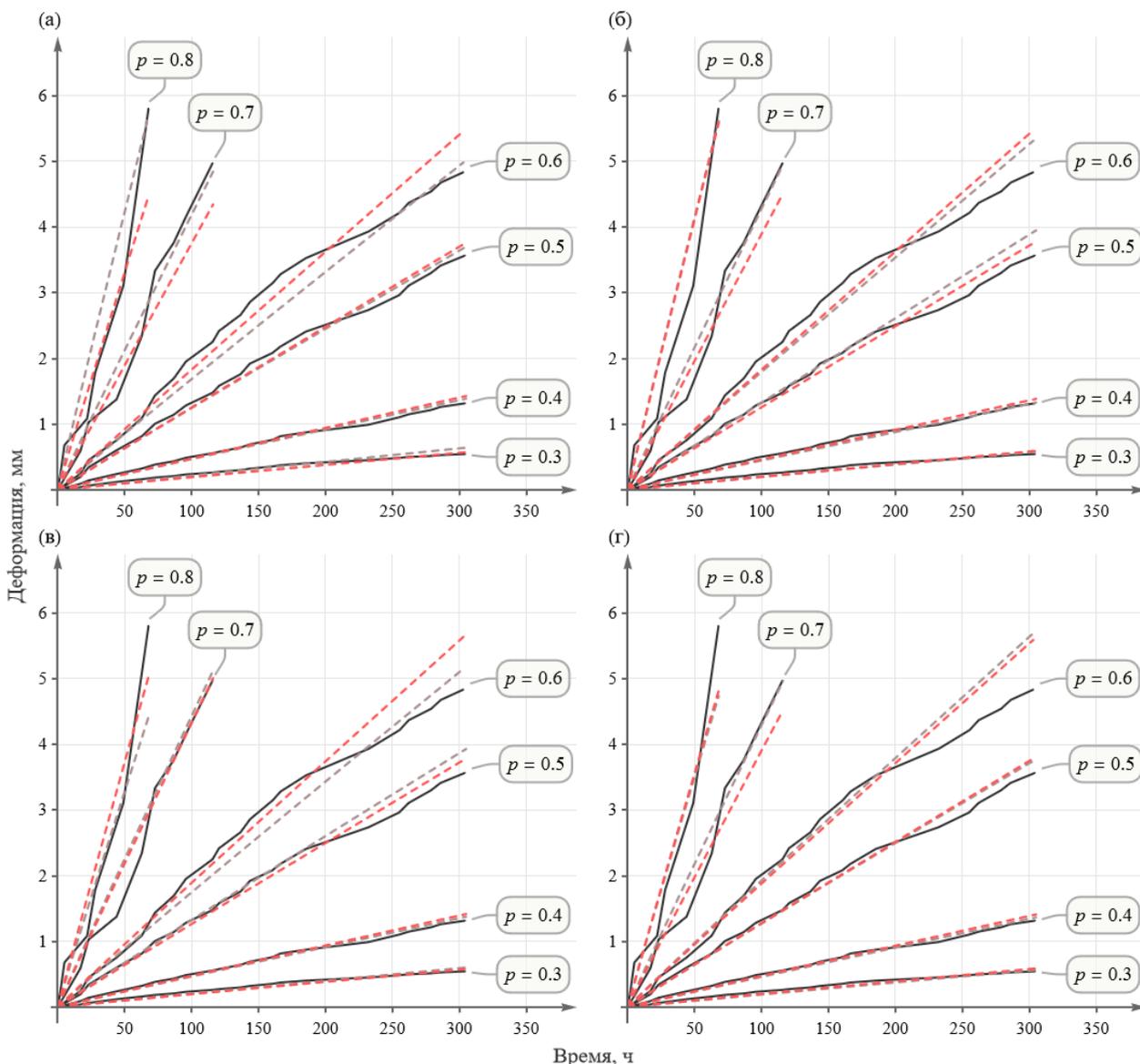


Рис. 1. – Результаты моделирования процесса установившейся ползучести в соляных образцах вместе с экспериментальными данными (■) при разных уровнях нагружения для неассоциированного критерия Кулона-Мора (■) и ассоциированного объёмного критерия прочности горных пород (■) в сочетании с вязкопластическими законами: Бингама (а), Дюво-Лионса (б), Пержины (в), Перича (г)

В сочетании с указанными критериями пластичности были рассмотрены два однопараметрических и два двухпараметрических закона вязкопластичности:

1. Закон Бингама [9]

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{\eta} \Phi(\sigma, \mathbf{A}), \quad (2)$$

где единственным параметром модели является коэффициент вязкости η ;

2. Закон Дюво-Лионса [11], как расширение упругопластической модели

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{1}{\tau} C^e : (\sigma - \hat{\sigma}), \quad (3)$$

в котором C^e это тензор упругого соответствия четвёртого ранга, двоеточие обозначает двойное скалярное произведение тензоров, τ – время релаксации, а $\hat{\sigma}$ – опорное напряжение, соответствующее ближайшей проекции тензора напряжений на поверхность текучести;

3. Закон Пержины [9]

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{\eta} \left[\frac{\sigma_e}{\sigma_y} - 1 \right]^{1/m}, \quad (4)$$

где σ_e есть некое эквивалентное напряжение, σ_y – соответствующий предел текучести, а также m – параметр чувствительности скорости/скоростного упрочнения;

4. Закон Перича [9]

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{\eta} \left[\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y} \right)^{1/m} - 1 \right], \quad (5)$$

параметры которого аналогичны закону Пержины.

Результаты многовариантного численного моделирования процесса ползучести в образцах красного силвинита представлены на рис. 1.

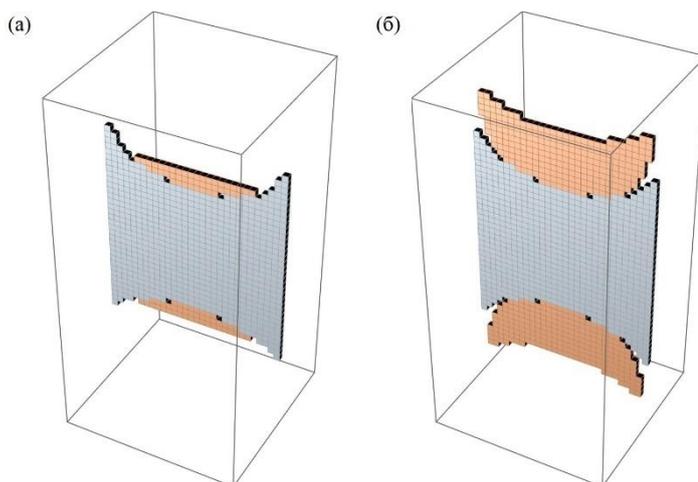


Рис. 2. – Разрушение по центральному вертикальному сечению образца вследствие сдвига (■) и отрыва (■) в соответствие с ассоциированным объёмным критерием пластичности и законом вязкопластического деформирования Перича при уровнях нагружения: 0.6 (а) и 0.8 (б)

Таким образом, все рассмотренные законы вязкопластичности отражают нарастание продольной деформации соляных образцов в процессе ползучести. При этом следует отметить, что критерии пластичности, совмещённые с вязкопластическим законом Перича, характеризуются относительно простым, стабильным параметрическим обеспечением и приемлемо описывают стадию установившейся ползучести. Использование вязкопластической модели деформирования позволяет выделить по заданному критерию прочности области разрушения, формирующиеся в процессе ползучести. На рис. 2 представлено разрушение соляного образца по его вертикальному сечению вследствие сдвига и отрыва при различных уровнях его нагружения.

Разработанная и верифицированная по результатам экспериментальных исследований упруго-вязкопластическая модель позволяет адекватно описать процессы деформирования и разрушения горнотехнических конструкций во времени.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.7.1.

Литература

1. Udartsev A., Pankov I. The study of silvinit and carnallite deformations under instaneous and sustained loading // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 32, №22. pp. 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.027>
2. Li Z., Kang Y., Fan J., Fourmeau M., Jiang D., Nelias D. Creep-fatigue mechanical characteristics of salt rocks under triaxial loading: An experimental study // Engineering Geology. 2023. Vol. 322. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107175>
3. Osipov Yu.V., Voznesensky A.S. Determination of rheological properties of bischofite from triaxial tests // Journal of Mining Science. 2022. Vol. 58, №6. pp .886-895. <https://doi.org/10.1134/s1062739122060023>
4. Konstantinova S.A., Chernopazov S.A. Estimating salt rocks rheology by in-situ observations of vertical deformation of interchamber pillars // Journal of Mining Science. 2007. Vol. 43, №3. pp.17-23. <https://doi.org/10.1007/s10913-007-0003-9>
5. Baryakh, A., Tsayukov, A. Justification of fracture criteria for salt rocks // Frattura Ed Integrità Strutturale. 2022. Vol. 16, №62. pp. 585–601. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.62.40>
6. Labuz, J.F., Zang, A. Mohr–Coulomb Failure Criterion // Rock Mech Rock Eng. 2012. Vol. 45. pp. 975–979. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>
7. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Об одном критерии прочности горных пород // Чебышевский сборник. 2017. Т. 18, №3. С. 72-87. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2017-18-3-72-87>
8. Морозов И.А., Ударцев А.А., Паньков И.Л. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // ГИАБ. 2020, №10. С.16-28. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28>
9. de Souza Neto, E.A., Perić, D. and Owen, D.R.J. Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2008. 791 p. <https://doi.org/10.1002/9780470694626>
10. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. and Fox, D. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics, 7th edition. Butterworth-Heinemann, 2014. 624 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-26332-X>
11. de Borst, R., Crisfield, M.A., Remmers, J.J.C., Verhoosel, C.V. Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, 2nd Edition. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2012. 516 p. <https://doi.org/10.1002/9781118375938>
12. Quevedo R., Firme P., Roehl D. Integration schemes with substepping algorithms for creep analysis in geomaterials // Int J Numer Anal Methods Geomech. 2019. Vol. 43. pp. 1467–1487. <https://doi.org/10.1002/nag.2910>

О РЕЗУЛЬТАТАХ КОМПЛЕКСНЫХ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СОЛЯНЫХ ПОРОД В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

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

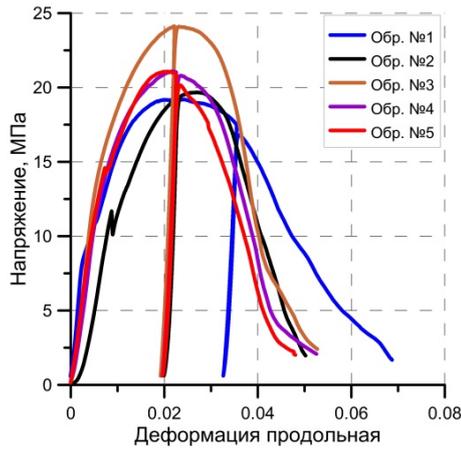
«Горный институт УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН

При разработке месторождений водорастворимых руд особое внимание уделяется предотвращению возможности проникновения подземных вод в выработанное пространство рудника [1]. Особенно остро данная проблема стоит для Верхнекамского и Гремячинского месторождений солей, геологический разрез которых характеризуется наличием водоносных горизонтов, залегающих выше обрабатываемых калийных пластов и отделенных от них водозащитной толщей (ВЗТ). Нарушение безопасных условий ведения горных работ может привести к критическим деформациям ВЗТ с образованием водопроводящих трещин и, как следствие, затоплению калийного рудника. Для предотвращения разрушения ВЗТ очистные работы должны вестись с оставлением “жестких” поддерживающих целиков, рассчитываемых на бесконечный срок службы и имеющих степень нагружения меньше нормативной (допустимой) [2]. При этом, нормативная степень нагружения целиков устанавливается, в том числе, исходя из данных экспериментального определения коэффициента длительной прочности (K_∞), представляющего собой отношение предела длительной прочности к пределу прочности на сжатие. В этой связи, изучение деформирования соляных пород при длительных режимах нагружения с целью уточнения нормативной степени нагружения грузонесущих элементов камерной системы разработки, является актуальной задачей геомеханического обеспечения безопасности горных работ и защиты калийных рудников от затопления.

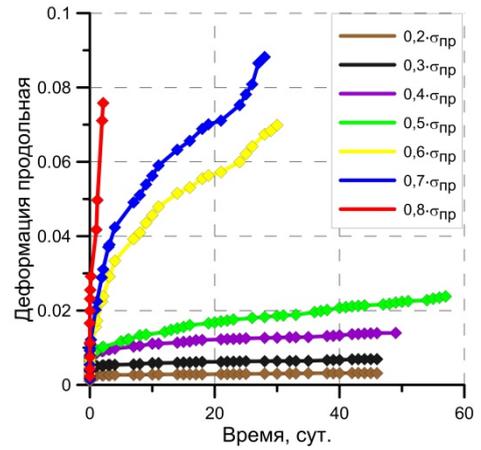
Для решения поставленных задач выполнялся комплекс лабораторных экспериментов, включающих квазистатические и реологические испытания соляных пород при одноосном сжатии. Эксперименты проводились на образцах красного и пестрого сильвинита, карналлита и каменной соли, имеющих различное отношение высоты к ширине и изготовленных из породных монолитов, отобранных на шахтных полях рудников Верхнекамского месторождений солей.

Квазистатические испытания выполнялись на электромеханическом прессе Zwick/Z250, обеспечивающем жесткий режим нагружения соляных пород [3]. По результатам испытаний строились полные диаграммы деформирования (рис. 1, а), используемые для определения прочностных и деформационных показателей на до- и запредельной стадиях.

Реологические испытания в условиях одноосного сжатия проводились на гидравлических прессах, позволяющих одновременно испытывать до трех образцов в режиме ползучести [3]. С целью исключения влияния влажности во время испытаний образцы герметизировались с помощью тонкой полиэтиленовой оболочки. Измерение продольных деформаций осуществлялось двумя симметрично установленными индикаторами часового типа. Длительные испытания соляных пород на ползучесть осуществлялись при уровнях нагружения (K) в диапазоне $0,2 \div 0,8$ от предела прочности, полученного при проведении квазистатических испытаний. По результатам экспериментов строились кривые ползучести (рис. 1, б), по которым определялись скорости относительных деформаций на установившейся стадии.



(a)



(б)

Рис. 1. – Диаграммы деформирования (а) и кривые ползучести (б) (на примере образцов пестрого силлинита)

Полученные результаты использовались для построения функции скорости, представляющей степенную зависимость влияния уровня нагружения на скорость установившейся ползучести (рис. 2, а):

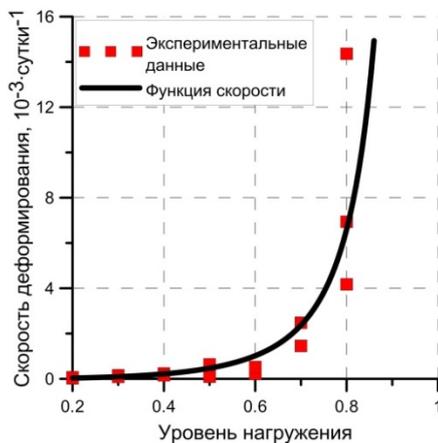
$$\dot{\epsilon} = A \cdot \left(\frac{K}{1-K} \right)^n, \quad (1)$$

где A и n – параметры аппроксимации.

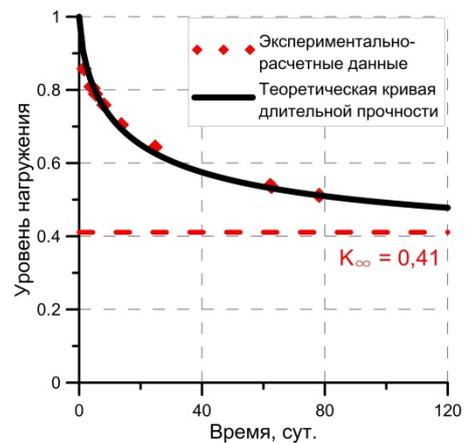
Зависимость (1) использовалась для корректировки действующего уровня нагружения для каждого исследуемого образца. Время разрушения (t_p) определялось путем экстраполяции стадии установившейся ползучести до критических значений, соответствующих деформациям на остаточном пределе прочности при квазистатических испытаниях. Анализ результатов проведенных исследований показал, что для описания теоретических кривых длительной прочности соляных пород (рис.2, б) можно использовать функцию вида:

$$K = 1 - (1 - K_\infty) \cdot \frac{t_p^{0,7}}{t_p^{0,7+B}}, \quad (2)$$

где B – параметр функции.



(a)



(б)

Рис. 2. – Зависимость скорости установившейся ползучести от уровня нагружения (а) и теоретическая кривая длительной прочности (б) (на примере образцов пестрого силлинита)

Для вычисления параметров K_∞ и B теоретической кривой длительной прочности (2) использовалась линейная аппроксимация $y = a \cdot x + b$, получаемая путем введения новых переменных $y = 1/(1 - K)$ и $x = 1/t_p^{0,7}$. В соответствии с проведенными преобразованиями, вычисление параметров проводилось по формулам:

$$K_\infty = \frac{b-1}{b}, B = \frac{a}{b}. \quad (3)$$

По разработанной методике вычислялся коэффициент длительной прочности для каждого типа соляных пород, представленных каменной солью, карналлитом и сильвинитом с различным отношением высоты образцов к их ширине.

Также установлено, что время перехода соляных пород в стадию установившейся ползучести не превышает 3÷5 суток от начала проведения длительных экспериментов. Данное наблюдение подтверждается исследованиями других авторов [4]. В этой связи, при использовании разработанной методики определения коэффициента длительной прочности, базирующейся на оценке времени разрушения по скорости установившейся ползучести, продолжительность проведения длительных испытаний можно сократить до 5÷7 дней.

Результаты проведенных исследований предназначены для оценки допустимой степени нагружения соляных междукammerных целиков для условий конкретных отработываемых участков шахтных полей рудников различных калийных месторождений.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.7.2.

Литература

1. Шокин Ю. П. О нарушениях сплошности подработанной водозащитной толщи на калийных рудниках // Горный журнал. – 2019. – № 1. – С. 70-75. – DOI 10.17580/gzh.2019.01.15.
2. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей. Ч.1. Основные положения: утв. ПАО «Уралкалий». – Пермь, Березники, 2022 г. – 117 с.
3. Ударцев, А. А. Изучение характера деформирования сильвинита в условиях одноосного сжатия при различных режимах нагружения / А. А. Ударцев, И. Л. Паньков // Горное эхо. – 2022. – № 4(89). – С. 54-59. – DOI 10.7242/echo.2022.4.9. – EDN IAHUUF.
4. Агеенко В. А. Обоснование оптимальных параметров экспресс-метода определения характеристик ползучести каменной соли: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. тех. наук: 25.00.20. - Москва. 2020. - 25 с.

ЭВОЛЮЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Девятков С.Ю., Ломакин И.С., Федосеев А.К.

«ГИ УрО РАН» - филиал ФИЦ УрО РАН

Для оценки изменения состояния водозащитной толщи (ВЗТ) и всего подработанного массива во времени использовался реологический подход, основанный на математическом описании графиков нарастания оседаний земной поверхности [1].

В рамках линейной теории наследственной вязкоупругости принималось, что вертикальные смещения дневной поверхности изменяются во времени, согласно соотношению:

$$v(t) = v_0 \left(1 + \int_0^t K(\tau) d\tau \right) = v_0 [1 + \Phi(t)], \quad (1)$$

где v_0 - упругие смещения, связанные с формированием выработанного пространства, $K(t - \tau)$ - функция влияния напряжения $\sigma(\tau)$ в момент времени на деформацию в момент времени t , $\Phi(t)$ - функция ползучести. Поскольку реальные графики нарастания оседаний определяются разностью полных и упругих смещений, то

$$\eta(t) = v(t) - v_0 = v_0 \Phi(t). \quad (2)$$

В этом случае задача определения реологических параметров сводится к подбору такой теоретической функции $\eta(t)$, которая наилучшим образом описывала бы экспериментальную или прогнозную кривую нарастания оседаний земной поверхности.

Для реализации рассмотренного реологического подхода предложена модификация [1] известного метода переменных модулей [2], согласно которой переменными во времени модулями описывается деформирование не всех элементов геологического разреза, а лишь отработанных пластов.

Пусть модуль деформации пласта на момент отработки определяется соотношением:

$$E^p = \frac{b}{a+b} E = (1 - \omega) E, \quad (3)$$

где a , b - соответственно ширина камеры и междукамерного целика, ω - коэффициент извлечения руды с пласта, E - модуль деформации породы.

Математически легко показать, что в зоне полной подработки зависимость вертикальных смещений от времени будет определяться выражениями (1), (2), если переменный модуль отработанного пласта представить соотношением [1]:

$$E_t^p(t) = \frac{E^p}{1 + (1 - \omega)\Phi(t)} \quad (4)$$

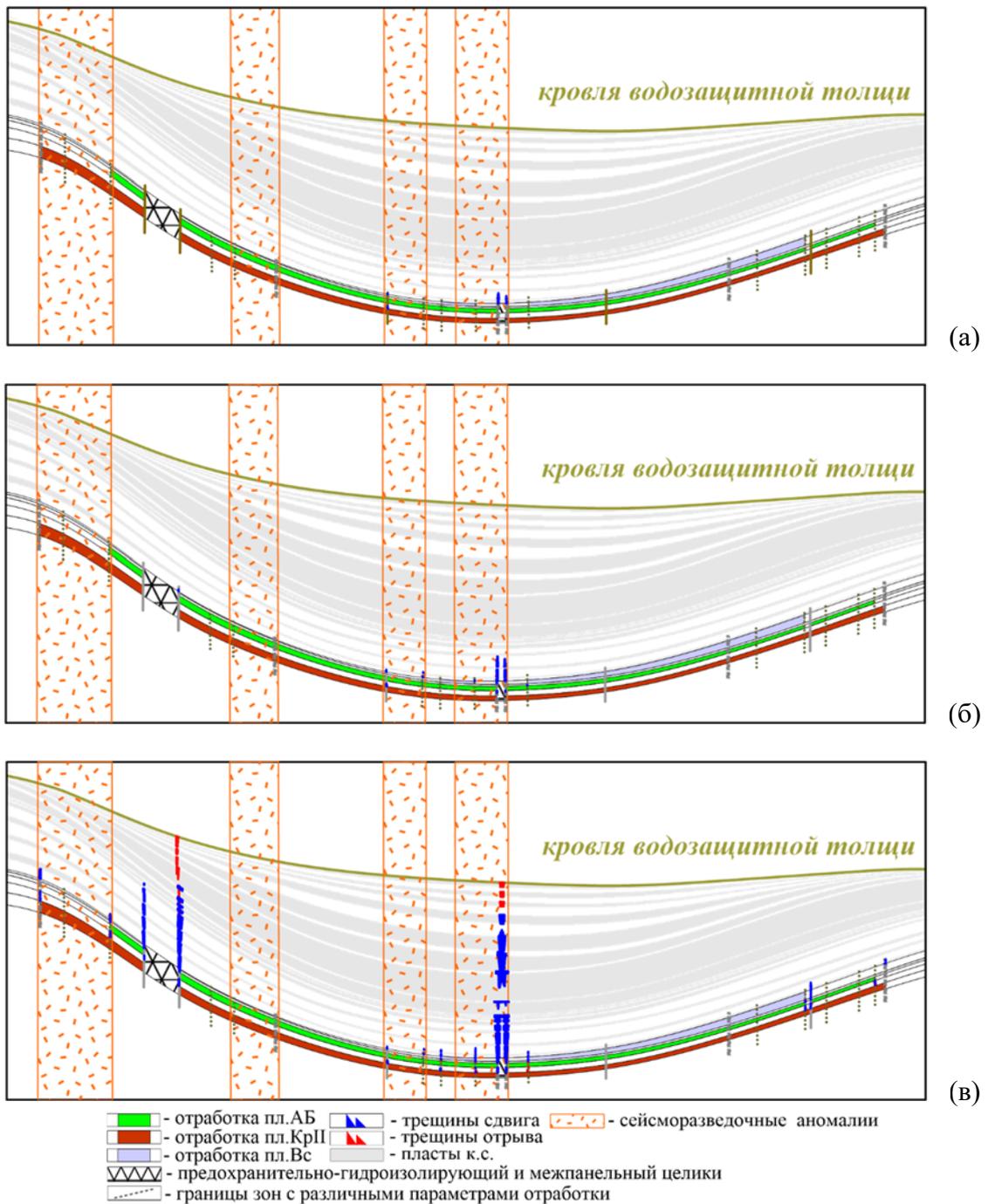


Рис. 1. – Характер формирования зон техногенной нарушенности после отработки продуктивных пластов (а); а также по прошествии 20 (б) и 100 (в) лет после их отработки

При отработке нескольких пластов действие выражения (4) с соответствующими параметрами (коэффициент извлечения, модуль деформации пород) и функцией ползучести $\Phi(t)$ распространяется на каждый из них.

С учетом (4) реализация предложенного реологического подхода сводится к отысканию для каждого отработанного пласта временной функции $\Phi(t)$. Преимущество этой модификации метода переменных модулей заключается в том, что она позволяет отдельно описать временной характер деформирования всех отработанных пластов, легко учесть разницу в сроках их отработки и оценить состояние подработанного массива на произвольный момент времени, включая конец процесса сдвижения.

Оценка степени изменения состояния ВЗТ при развитии процесса сдвижения базировалась на анализе потенциальной возможности формирования в массиве трещин субвертикальной ориентации. Для рассматриваемой идеальной упругопластической среды связь между деформациями и напряжениями на допредельной стадии описывалась законом Гука, а предельные напряжения в области сжатия определялись критерием Кулона-Мора [3], представленным в виде параболической огибающей кругов Мора:

$$\tau_{max} = \tau_{пр} = \sqrt{(\sigma_{раст} + \sigma_n)[2\sigma_{раст} - 2\sqrt{\sigma_{раст}(\sigma_{раст} + \sigma_{сж}) + \sigma_{сж}}]} \quad (5)$$

где $\sigma_{сж}$ и $\sigma_{раст}$ соответственно пределы прочности породы на одноосное сжатие и растяжение. Касательное (τ_{max}) и нормальное (σ_n) напряжения определяются на площадках, где отношение $\tau_{пр}/\tau_{max}$ достигает максимального значения.

Локализация пластических деформаций в физическом смысле трактовалась, как разрушение пород ВЗТ: в области сжатия вследствие развития трещин сдвига, в области растяжения – трещин отрыва. Исходя из этих позиций, и производился анализ опасности нарушения сплошности ВЗТ под воздействием горных работ.

При проведении геомеханических расчетов выделенные на этапе сейсморазведочных работ природные аномалии учитывались как области с пониженными, в соответствии с установленным коэффициентом ослабления, прочностными и деформационными свойствами соляных пород.

На рис. 1 представлен пример развития зон субвертикальной трещиноватости над отработанным пространством на различные моменты времени по результатам математического моделирования. Хорошо видно влияние временного фактора на интенсивность техногенных нарушений в ВЗТ.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.7.3.

Литература

1. Барях А.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов / Барях А.А. Самоделкина Н.А. // ФТПРПИ. - 2005. - №6.
2. Амосин Б.З., Линьков А.М. Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести // Механика твердого тела. – 1974. - № 6.
3. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород // М.: Углетехиздат. – 1947.

Автомодельные закономерности стадийности пластической деформации и разрушения

Наймарк О.Б., Юрина А.Д.

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

Процессы пластической деформации и разрушения демонстрируют выраженные признаки, характерные для поведения неравновесных «критических» систем при переходе от упругого деформирования к пластическому течению, на различных стадиях пластичности и поврежденности, включая зарождение и распространение макроскопических трещин. Проявления «критичности» связываются в [1] с автомодельными закономерностями формирования коллективных мод дефектов, играющих роль «коллективных» степеней свободы, которые могут «подчинять» динамику (кинетику) процессов деформирования и разрушения. «Подчинение» проявляется в степенных законах, связывающих «наблюдаемые» переменные, например «скорость пластических деформаций» $\dot{\varepsilon}^p$ и «амплитуду напряжений» σ_a^m ($\dot{\varepsilon}^p = A\sigma_a^m$, соотношения Swegle-Grady) на волновых фронтах в диапазоне скоростей деформаций $\dot{\varepsilon} \sim 10^5 - 10^7 \text{ с}^{-1}$; «скорость роста усталостной трещины» da/dN и «коэффициент интенсивности напряжений» ΔK ($da/dN = C(\Delta K)^m$, закон Пэриса) при многоцикловых нагружениях. Обращает на себя также универсальность степенного показателя $m \sim 4$, отражающего тип критического перехода при формировании различных дислокационных структур при развитии пластической деформации в вершине усталостной трещины и формировании пластических волновых фронтов.

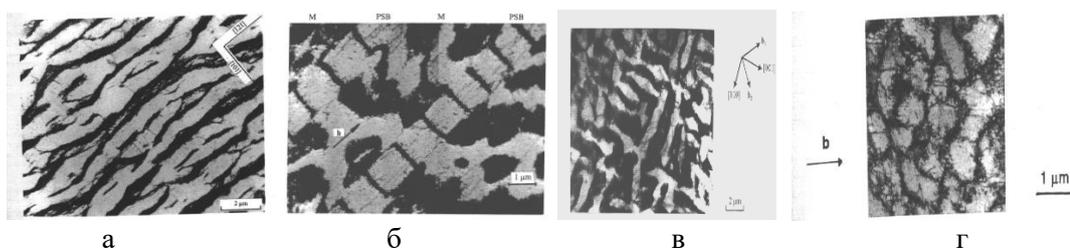


Рис.1 Формирование дислокационных структур (коллективных мод) в кристалле меди при циклических нагружениях: а- матричная «венозная» структура; б - «лестничная» структура; с- «лабиринтная» структура; г- «ячеистая» структура (с разрешения Н.Mughrabi).

«Огрубление» дислокационных структур приводит к исчерпанию способности материала к пластической релаксации и инициированию очагов разрушения, которые, взаимодействуя с основной трещиной, обеспечивают ее распространение

Формирование дислокационных структур характерно для всех стадий циклического нагружения и наиболее четко проявляется при сверхмногоцикловых нагружениях и инициирует зарождение «малых» трещин a_0 , их рост, формирование и распространение трещин по сценарию Пэриса (Рис.2).

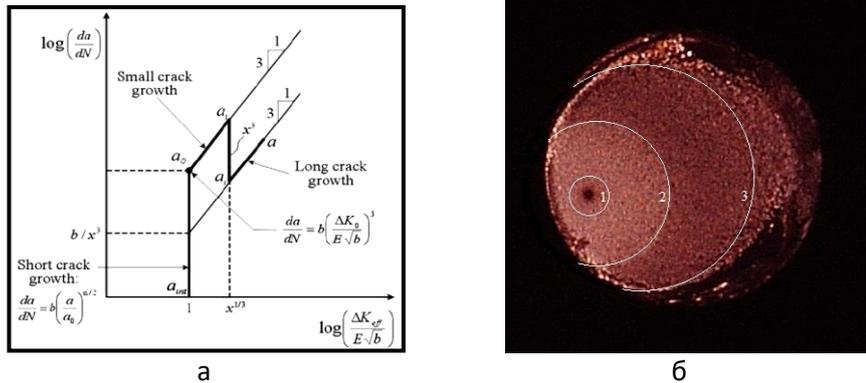


Рис.2. а- Диаграмма Батиаса-Пэриса инициирования усталостных трещин и их роста при сверхмногоцикловых нагружениях; б - фрактография поверхности излома при сверхмногоцикловых нагружениях [2] (1) – область инициирования малой трещины, (2) - область роста малой трещины, (3) – область распространения трещины по сценарию Пэриса.

Представляет интерес сопоставление стадийности инициирования и роста усталостных трещин с использованием соотношения Пэриса, которое отражает типичные закономерности «критичности» в развитии поврежденности в вершине трещины, в так называемой, «зоне процесса – Process- Zone», отраженные в степенном законе для коэффициента интенсивности $(\Delta K)^m$, который играет роль «параметра порядка» для среды с трещиной. При этом две предшествующие распространению трещины стадии (инициирования малой трещины и ее рост до размера трещины Пэриса) интегрально отражены в значении коэффициента C

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

Уравнение Пэриса отражает закономерности инициирования зоны разрушения в окрестности вершины трещины, при этом «классическая» величина показателя $m \sim 4$ характеризует вклад наиболее диссипативно «емкого» механизма, связанного с переходами между дислокационными структурами в пластичных материалах. Связь «структурного» скейлинга с величиной показателя m исследована в [2] на основе вычисления пространственных инвариантов по данным профилометрии высокого разрешения поверхности разрушения. Значение коэффициента C , являющегося кинетическим параметром, определяет «время индукции», традиционно используемого в теории горения и взрыва, и характеризующего в данном случае «критическую топологию» распределения дефектов, предшествующую переходам между типами дислокационных структур по автомодельному сценарию с соответствующим показателем степени.

Представляет интерес обобщение закона Пэриса для описания кинетики роста трещин в пластичных и квазихрупких материалах [3]

$$\frac{da}{dN} = C(K_{max})^n (\Delta K)^m, \quad (2)$$

где K_{max} - максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений, n – соответствующий показатель степени, который может существенно превосходить m : $n \gg m$. Этот эффект также может быть интерпретирован в терминах характерных «времен

индукции», вводя новый кинетический коэффициент $C' = C(K_{\max})^n$, определяющий минимальные времена инициирования «критических структур», предшествующих формированию очагов разрушения и распространения макроскопической трещины. Наличие двух механизмов, контролирующих распространение усталостных трещин, подтверждается измерениями двух характерных значений показателей скейлинга рельефа поверхностей разрушения и показателей диссипации энергии в вершине усталостной трещины [4], которые могут быть интерпретированы терминах параметров, характеризующих «времена индукции» и показателей степени.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача №1.8.1, 1.8.2.

Литература

1. Naimark O. Duality of singularities of multiscale damage localization and crack advance: length variety in Theory of Critical Distances // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2019. – Vol. 13. – №. 49. – pp. 272-281. doi: 10.3221/IGF-ESIS.49.27
2. Naimark O., Oborin V., Bannikov M., Ledon D. Critical dynamics of defects and mechanisms of damage-failure transitions in fatigue // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – №. 10. – pp. 2554. doi:10.3390/ma14102554
3. Ritchie R. O. Incomplete self-similarity and fatigue-crack growth // *International Journal of Fracture*. – 2005. – Vol. 132. – pp. 197-203. doi:10.1007/s10704-005-2266-y
4. Vshivkov A.N., Iziumova A. Yu., Panteleev I.A., Ilinykh A.V., Wildemann V.E., Plekhov O.A. The study of a fatigue crack propagation in titanium Grade 2 using analysis of energy dissipation and acoustic emission data // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2019. – Vol. 210. – P. 312-319. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.05.012>

«Щелевые состояния» и механизмы переноса импульса в вязкоупругих средах

Князев Н.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б.

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

Определение вида дисперсионных соотношений играет важную роль для понимания фундаментальных свойств и поведения частиц, квазичастиц и волн в различных средах. Дисперсионные соотношения с разрывом в пространстве импульсов (k -пространстве) [1] связываются с механизмами развития турбулентности, пластичности и разрушения, эффектами в пылевой плазме и биологических системах [2].

Состояния с разрывом в k -пространстве возникают в различных областях физики. Так, например, «щелевые состояния» проявляются при изучении динамики коллективных сдвиговых мод в жидкостях и распространения электромагнитных волн в сильно связанных системах (плазме, сверхпроводниках, ферромагнетиках). Появление «щелевых состояний» указывает на особые динамические и термодинамические свойства системы и зачастую связано с диссипацией энергии в открытых неравновесных системах.

Настоящая работа направлена на обнаружение феномена «щелевых состояний» при исследовании вязкоупругих свойств конденсированных сред. Для этого был проведён вывод и анализ дисперсионных соотношений с использованием вязкоупругих моделей Кельвина-Фойгта, Максвелла, стандартного линейного тела, модели Кельвина-Фойгта с дробной производной. В качестве основного уравнения выступает волновое уравнение в идеально-упругих телах, которое затем модифицируется с помощью соответствующих вязкоупругих моделей для учета вязкости и диссипации.

Так при использовании модели Максвелла линейная зависимость между напряжениями и деформациями сменяется на

$$\sigma = G(1 - B^{-1})\varepsilon, \quad (1)$$

где σ – сдвиговые напряжения, ε – сдвиговые деформации, $B = 1 + \tau_\varepsilon \frac{d}{dt}$, $\tau_\varepsilon = \frac{\eta}{G}$ – время релаксации из модели Максвелла, G, η – модуль сдвига и коэффициент вязкости структурных элементов модели Максвелла. В результате конечная форма волнового уравнения принимает вид

$$c^2 \tau_\varepsilon \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial v}{\partial t} + \tau_\varepsilon \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где c – скорость распространения волны в среде. Итоговый вид дисперсионного соотношения для уравнения (2) записывается как

$$\omega^2 + \frac{i}{\tau_\varepsilon} \omega - c^2 k^2 = 0. \quad (3)$$

Частоты, полученные из решения уравнения (3), принимают действительные значения при условии $k > k_g$, где $k_g = \frac{1}{2c\tau_\varepsilon}$. Это означает, что в диапазоне волновых чисел от 0 до k_g

образуется разрыв или «щель» в k -пространстве. Появление такого рода разрыва связано с конечной длиной распространения волн в вязкоупругой среде, поведение которой описывается моделью Максвелла.

В отличие от модели Максвелла, модель Кельвина-Фойгта не позволяет получить разрывы в пространстве импульсов. Дисперсионное соотношение, полученное из модели Кельвина-Фойгта, имеет вид (τ_σ – время ретардации):

$$\omega^2 + \tau_\sigma c^2 k^2 i \omega - c^2 k^2 = 0. \quad (4)$$

При использовании модели Кельвина-Фойгта с дробной производной дисперсионное соотношение (4) преобразуется в

$$-G_0 k^2 - G_0 \tau_\sigma^\gamma k^2 (-i\omega)^\gamma \left(1 - \frac{\Gamma(-\gamma, -i\omega t)}{\Gamma(-\gamma)} \right) = -\rho \omega^2, \quad (5)$$

однако в этом случае также никаких разрывов не наблюдалось. Для описания поведения вязкоупругого элемента в схеме была использована дробная производная Римана-Лиувилля с гамма функцией Γ . Показано совпадение результатов классической модели Кельвина-Фойгта с дробной моделью при стремлении параметра дробной производной γ к единице.

Любопытные результаты были получены при анализе дисперсионного соотношения из модели стандартного линейного тела, имеющего вид:

$$\omega^3 + \frac{i}{\tau_\varepsilon} \omega^2 - \frac{k^2 G_0}{\rho} \frac{\tau_\sigma}{\tau_\varepsilon} \omega - \frac{k^2 G_0 i}{\rho \tau_\varepsilon} = 0, \quad (6)$$

где $\tau_\varepsilon = \frac{\eta}{G_1}$ – время релаксации, $\tau_\sigma = \frac{(G_1 + G_0)}{G_1 G_0} \eta$ – время ретардации модели. Решение

кубического уравнения (6) вычислялось аналитически с использованием тригонометрических формул Виета. В результате были построены графики зависимости частоты от волнового числа при изменении параметров модели, а также выявлен критерий появления «щели» в k -пространстве:

$$-4\rho^2 - 4G_0^2 k^4 \tau_\sigma^3 \tau_\varepsilon + G_0 k^2 \rho (\tau_\sigma^2 + 18\tau_\sigma \tau_\varepsilon - 27\tau_\varepsilon^2) \geq 0. \quad (7)$$

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.8.1.

Литература

1. Baggioli M., Brazhkin V., Trachenko K., Vasin M. Gapped momentum states // Phys. Rep. 2020. Vol. 865. P. 1-44. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.04.002>
2. Naimark O. Collective modes of defects and gapped momentum states in liquids // AIP Conf. Proc. 2022. Vol. 2509. 020139. <https://doi.org/10.1063/5.0085489>

МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ И РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ

Баяндин Ю.В., Савельева Н.В., Наймарк О.Б.

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

Детали промышленных конструкций авиационной, космической и энергетической отраслей в процессе эксплуатации испытывают огромное количество повторяющихся циклов нагрузки, обусловленных как механическими, так и термическими воздействиями. При этом, с одной стороны их элементы спроектированы таким образом, чтобы материал работал в упругой области, а с другой стороны – элементы должны выдерживать длительный ресурс, превышающий 10^{10} циклов нагружения (режим сверхмногоциклового усталости) [1-4]. Характерной чертой развития разрушения в условиях сверхмногоциклового усталости является образование усталостной трещины в объеме материала [3,4], что решающим образом меняет постановку проблемы оценки усталостного ресурса, методов исследования стадийности развития разрушения и учета внешних факторов. В противоположность сложившимся традициям в области многоциклового усталости, где центральное внимание уделяется стадии распространения трещин, возникает фундаментальная проблема о механизмах зарождения усталостной трещины в ходе многомасштабных процессов развития поврежденности, ассоциируемой с дефектами различной природы (включения, полосы локализованного пластического сдвига, микротрещины, поры). Проблемы увеличения ресурса при этом связываются с исследованием роли структурных факторов, а механизмы накопления поврежденности и развития разрушения обусловлены образованием дефектов на различных масштабных уровнях при напряжениях намного ниже предельных значений (предела текучести для пластичных материалов или предела пропорциональности для квазихрупких материалов).

Актуальной задачей является разработка математических моделей, учитывающих особенности накопления повреждений и позволяющих описание стадийности циклического нагружения, в том числе с учетом термомеханических воздействий. Модель должна учитывать механизмы неупругого деформирования при напряжениях как ниже, так и выше условного предела текучести. При этом для режимов много- и сверхмногоциклового усталости необходимо вводить внутренние переменные, отвечающие за неупругое накопление повреждений в объеме материала, которое не может быть описано в рамках классических представлений механики деформируемого твердого тела. Таким образом, общая деформация твердого тела с дефектами обусловлена его упругой реакцией, термическим расширением и неупругими составляющими вязкопластической деформации (не связанной с нарушением сплошности) и деформации, обусловленной образованием дефектов (нарушение сплошности).

Разработанная математическая модель для описания разрушения при усталостном нагружении базируется на широкодиапазонных определяющих соотношениях статистической теории дефектов в твердом теле [5] и имеет следующий вид

$$\rho \dot{\mathbf{v}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (1)$$

$$\dot{\rho} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_s + \boldsymbol{\sigma}_d, \boldsymbol{\sigma}_s = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{I} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^R = \mathbf{C} : (\mathbf{D} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \dot{\boldsymbol{p}} - \boldsymbol{\alpha} \dot{T}) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^R = \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T \quad (6)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\varepsilon}_0^{n_\varepsilon} \exp\left(\frac{U(T)}{kT}\right) (\Gamma_\sigma \boldsymbol{\sigma}_d - \Gamma_{p\sigma} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}) \quad (7)$$

$$\dot{\boldsymbol{p}} = \dot{\varepsilon}_0^{n_p} \exp\left(\frac{U(T)}{kT}\right) (\Gamma_{p\sigma} \boldsymbol{\sigma}_d - \Gamma_p \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}) \quad (8)$$

$$\dot{\boldsymbol{\delta}} = -\dot{\varepsilon}_0^{n_\delta} \Gamma_\delta \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\delta}} \quad (9)$$

$$U(T) = \frac{k}{T_c^m} T^{m+1} \quad (10)$$

$$\frac{F}{F_m} = \frac{p^2}{2} - \frac{p^2}{2\delta} + c_1 p + c_2 \ln(c_3 + c_4 p + p^2) - \frac{\boldsymbol{\sigma}_d : \mathbf{p}}{2G} \quad (11)$$

$$\rho c \dot{T} = \boldsymbol{\sigma}_d : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \frac{\partial F}{\partial p} : \dot{\boldsymbol{p}} - \boldsymbol{\alpha} T : \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \nabla \cdot \lambda \nabla T \quad (12)$$

где ρ – массовая плотность; \mathbf{v} – вектор скорости; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений, $\boldsymbol{\sigma}_s$ и $\boldsymbol{\sigma}_d$ – его шаровая и девиаторная части; $\nabla(\cdot)$ – оператор градиента в текущей конфигурации; $\dot{(\cdot)}$ – материальная производная; \mathbf{D} – тензор деформации скорости, $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ – тензор пластических деформаций; \mathbf{C} – тензор упругих свойств четвертого ранга; \mathbf{I} – единичный тензор; $\dot{\varepsilon}_0 = \sqrt{(2/3) \mathbf{D} : \mathbf{D}} / \dot{\varepsilon}_c$, $\dot{\varepsilon}_c = 1 \text{ с}^{-1}$ – обезразмеривающий множитель; k – константа Больцмана; Γ_σ , $\Gamma_{p\sigma}$, Γ_p , Γ_δ – положительные кинетические коэффициенты; n_ε , n_p , n_δ – константы, отвечающие за скоростную чувствительность материала; F – потенциал неравновесной свободной энергии; \mathbf{p} – тензор плотности микродвигов, который по своему физическому смыслу является деформацией, обусловленной дефектами; $p = \sqrt{\mathbf{p} : \mathbf{p}}$; $\boldsymbol{\delta}$ – параметр структурного скейлинга, который по своему физическому смыслу является восприимчивостью материала и в общем случае является тензором четвертого ранга; c – удельная теплоемкость; $\boldsymbol{\alpha}$ – коэффициент теплового расширения, λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; F_m , c_1 – c_4 – константы аппроксимации свободной энергии F ; T_c , m – константы аппроксимации характерной энергии активации U ; \mathbf{R} – ортогональный тензор полярного разложения градиента места $\mathbf{F} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{U}$, где \mathbf{U} – правый симметричный положительно определенный тензор искажений.

Задача циклического нагружения решалась в одномерной постановке для ряда сплавов (алюминиевых, титановых) и композиционных материалов (углепластик). Разработанная математическая модель и численно-аналитическая реализация на ее основе позволили описание усталостного разрушения исследуемых материалов в широком диапазоне циклов нагружения (10^4 – 10^6), в том числе эффектов дуальности кривой усталости для металлов и сплавов, а также изменение предела выносливости с изменением частоты нагружения [6, 7].

Получена аналитическая зависимость числа циклов до разрушения при усталости от параметров нагружения. Разработанная модель в отличие от большинства известных моделей, учитывает зависимость не только от амплитуды приложенных напряжений, но и от частоты нагружения, скорости деформации, чувствительности к скорости деформации и исходного структурного состояния материала, определяемого структурным параметром

и имеющим смысл восприимчивости материала. При этом дополнительный структурный параметр определяется своим кинетическим уравнением, в соответствии с термодинамическим потенциалом твердого тела с дефектами, и характеризует деградацию упругих свойств в процессе термомеханических воздействий.

Разработанная математическая модель в трехмерной постановке внедрена в коммерческие пакеты конечно-элементного анализа с учетом термомеханических воздействий. Для демонстрации работоспособности предложенной модели решена краевая задача для распространяющейся на поверхность из объема образца усталостной трещины, что соответствует режиму сверхмногоциклового усталости. Разработанные авторами подходы позволяют изучение закономерностей и эффектов усталостного деформирования и разрушения материалов авиационного моторостроения и ракетной техники на основе численно-аналитических или численных решений.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.8.1.

Литература

1. Ботвина Л.Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70, № 4. С. 41-51.
2. Bathias C., Paris P. C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. Marcel Dekker Publisher Co, 2005. 328 p.
3. Шанявский А.А., Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. Уфа: ООО «Монография», 2007. 500 с.
4. Bathias C., Paris P., Gigacycle fatigue of metallic aircraft components // International Journal of Fatigue. 2010. Vol. 32, No 6. P. 894-897.
5. Наймарк О. Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6, № 4. С. 45-72.
6. Биалов Д.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Математическое моделирование процесса разрушения сплава АМг2.5 в режиме много- и гигацикловой усталости // Вычислительная механика сплошных сред. 2018. Т. 11, № 3. С. 323-334.
7. Д.Р. Ледон, М.В. Банников, В.А. Оборин, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк. Прогнозирование усталостной долговечности титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях при сверхмногоциклового усталости. Письма о материалах. 2021. Т.11. №4. С.422-426.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Оборин В.А., Банников М.В., Наймарк О.Б.

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

Перед современными инженерами и исследователями стоит проблема оценки ресурса ответственных машиностроительных конструкций, превышающих $10^9 - 10^{10}$ циклов нагружения, в области, так называемой, сверхмногоциклового (гигацикловой) усталости [1 - 2], в частности, в области авиационного моторостроения, которая поставила ряд качественно новых задач фундаментального характера по оценке надежности таких материалов. Ресурс нагружения многих ответственных конструкций, работающих в режиме циклических нагрузок, превышает многоциклового диапазон. В свою очередь, поведение материалов в области гигацикловой усталости обнаруживает ряд закономерностей, относящихся к качественным изменениям, как условий зарождения трещин (в объеме образца), так и их распространения, связанных с качественной сменой механизмов зарождения и развития трещин усталости.

Образцы из высокопрочной стали R5 подвергались усталостным испытаниям в условиях симметричного цикла растяжения – сжатия с частотой 20 кГц на ультразвуковой испытательной машине с последующей регистрацией морфологии рельефа поверхности, обусловленного зарождением и развитием дефектов в вершине распространяющейся усталостной трещины (рис.1). Пространственные структурные масштабы, соответствующие различным стадиям перехода от повреждения к разрушению, определяются путем анализа корреляции шероховатости и оценки показателя Херста [3-4] и соответствующих структурных длин характерных участков поверхности трещины.

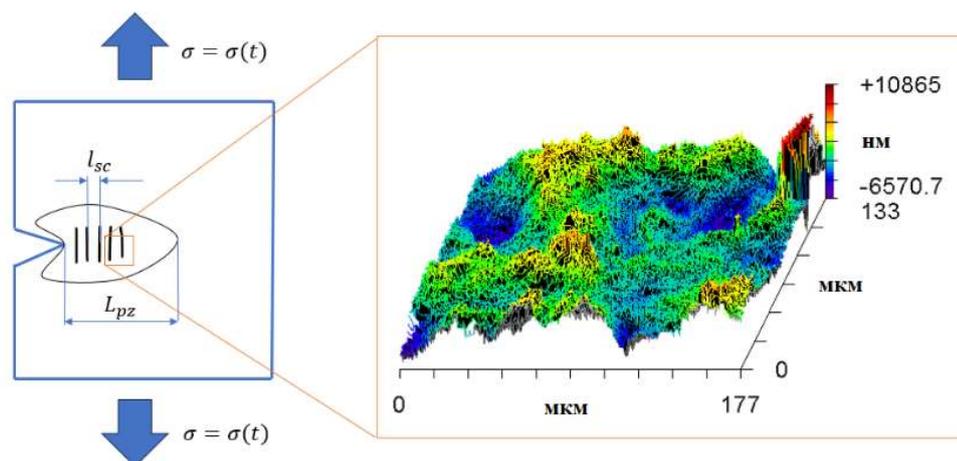


Рис. 1. - Схематическое изображение зоны процесса у вершины трещины и типичное изображение шероховатости поверхности

В работе предложено оригинальное кинетическое уравнение, устанавливающее связь между скоростью роста усталостной трещины, изменением коэффициента интенсивности напряжений и масштабными инвариантами, характеризующими

коррелированное поведение дефектов различных структурных уровней. Показана связь параметров кинетического уравнения (показателем степени в обобщенном законе Пэриса) с масштабными инвариантами дефектных структур, формирующих рельеф поверхности разрушения в процессе сверхмногоциклового нагружения.

В работе проведено исследование кинетики роста усталостных трещин в сплаве алюминия АМгб в режиме сверхмногоциклового усталости при предварительном динамическом деформировании [5-6] на основе определенных методами количественной фрактографии масштабных инвариантов. Актуальность постановки определяется важными приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полетного цикла при случайных динамических воздействиях.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.8.2

Литература

1. Ботвина Л.Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70, № 4. С. 41.
2. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. Marcel Dekker Publisher Co, 2005. 328 p.
3. Zaiser M. Scale invariance in plastic flow of crystalline solids // Advances in Physics. 2006. Vol. 55. P. 185–245.
4. Bouchaud E. Scaling properties of cracks // J. Phys. Condens. Matter. 1997. Vol. 9. P. 4319–4344.
5. Peters J.O., Ritchie R.O. Influence of foreign object damage on crack initiation and early crack growth during high-cycle fatigue of Ti-6Al-4V // Eng. Fract. Mech. 2000. Vol. 67. P. 193-207.
6. Spanrad S., Tong J. Characterisation of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens // Materials Science and Engineering A. 2011. Vol. 528. P. 2128–2136.

АНАЛИЗ СТАДИЙНОСТИ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ В СПЛАВАХ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ ПО СПЕКТРУ КОЛЕБАНИЙ СВОБОДНОГО ТОРЦА В ГИГАЦИКЛОВОМ РЕЖИМЕ

Банников М.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б.

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

Гигацикловый режим усталости, это процесс накопления повреждений в материалах при воздействии циклических нагрузок с очень большим числом циклов (более 10^9), который ставит новые задачи фундаментального характера по оценке надежности материалов и конструкций [1-2]. Главной особенностью возникновения трещин в таком режиме является факт, что она зарождается на внутренних неоднородностях материала, и выходит на поверхность только на критической стадии, когда уже возникают катастрофические последствия [3]. В работе предлагается использовать метод анализа спектра нелинейных колебаний свободного торца образца в процессе испытаний. Указанный способ позволяет установить кинетику накопления усталостных повреждений и разделить стадии зарождения и роста усталостной трещины.

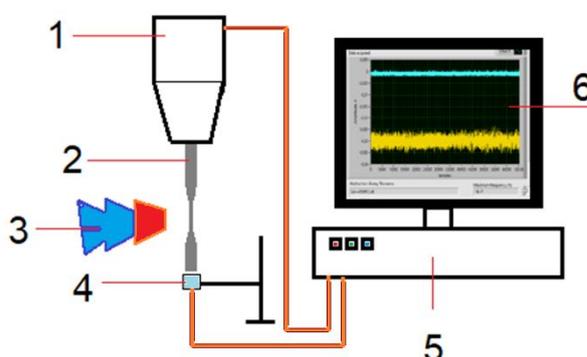


Рис. 1. – Схема испытаний на гигацикловую усталость с анализом спектра колебаний свободного торца: 1 – волновод с пьезоэлектрическим преобразователем сигналов; 2 – образец; 3 – система охлаждения; 4 – индуктивный датчик перемещений; 5 – система контроля испытаний и сбора данных.

Данная методика заключается в разделении сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье по частотам колебаний. Колебания свободного торца образца при испытаниях будут содержать ряд гармонических составляющих: компоненты с амплитудой $A1$ на основной частоте ω_0 , амплитудой $A2$ второй гармоники частотой $2\omega_0$, и так далее. Экспериментальное определение параметра нелинейности β , зависящего от амплитуды второй гармоники, которая связана с дефектной структурой [4-6] позволит непосредственно во время испытаний определить момент зарождения усталостной трещины, а его кинетика будет связана с кинетикой роста трещины.

Чувствительность индукционного датчика перемещений позволяет уловить такие изменения в амплитуде колебаний, которые могут предсказать начало зарождения трещины. Резкий всплеск амплитуды второй гармоники сигнализирует об образовании “fish eye”, а её дальнейший рост связан с ростом усталостной трещины как было показано с помощью рентгеновской томографии в работе [7]. Применение указанной методики совместно с анализом морфологии поверхностей разрушения позволило разделить стадии возникновения и роста усталостных трещин в гигацикловом диапазоне нагружения для

титановых и алюминиевых сплавов и построить кинетические диаграммы роста усталостных трещин, что позволит спрогнозировать ресурс деталей и конструкций из исследуемых материалов.

Установлены различные закономерности изменения амплитуды второй гармоники у образцов с крупнокристаллическим и субмикрокристаллическим состоянием, которые связаны с различными механизмами перераспределения деформаций внутри материала. Так у крупнокристаллических наблюдалось незначительное изменение амплитуды второй гармоники в процессе испытаний, тогда как у образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации наблюдались значительные монотонные изменения таковой, которые могут быть связаны с перераспределением внутренних напряжений.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.8.2

Литература

1. Шанявский А.А. Никитин А.Д. Солдатенков А.П. Сверхмногоцикловая усталость металлов. Синергетика и физическая мезомеханика. М.: Физматлит, 2022. 496 с.
2. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. Marcel Dekker Publisher Co, 2005. 328 p.
3. Шанявский А. А., Никитин А. Д. Сверхмногоцикловая усталость алюминиевого сплава Д16Т //Физическая мезомеханика. – 2020. Т. 23. №. 3. С. 43-53.
4. John H. Cantrell, William T. Yost Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures. Int. J. of Fatigue, 2001, 23, pp.487–490.
5. Биалов Д.А., Оборин В. А., Наймарк О. Б. Влияние интерметаллидных включений на образование подповерхностных трещин в сплаве АМг6 при гигацикловой усталости //Письма о материалах. 2020. Т. 10. №. 2. С. 206-210.
6. Naimark O., Oborin V., Bannikov M., Ledon D. Critical dynamics of defects and mechanisms of damage-failure transitions in fatigue // Materials. 2021. Vol. 14. №. 10. pp. 2554. doi:10.3390/ma14102554
7. N. Ranc, A. Messenger, A. Junet, T. Palin-Luc, J.Y. Buffière, N. Saintier, M. Elmay, L. Mancini, A. King, Y. Nadot, Internal fatigue crack monitoring during ultrasonic fatigue test using temperature measurements and tomography, Mechanics of Materials, Volume 174, 2022, 104471, ISSN 0167-6636, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104471>

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ PDV ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ГРАФИТА

А.Д. Юрина, С.В. Уваров

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

Исследование характеристик материалов при ударных воздействиях играет ключевую роль в понимании и повышении эксплуатационных качеств и надежности материалов для различных инженерных применений. В данной работе рассматриваются свойства силицированного графита и титанового сплава ВТ-6 при низкоскоростных ударах. Для анализа динамической реакции материалов используется метод фотонной доплеровской велосиметрии (PDV) с цифровой обработкой сигналов [1].

Экспериментальная установка (рисунок 1) представляет собой баллистическую систему с использованием сферического снаряда, что позволяет контролировать приложение нагрузок и подробно изучать поведение материала при воздействии среднего уровня нагрузок. Метод PDV, дополненный вейвлет-преобразованиями, используется для восстановления профилей скорости из полученных сигналов. Такой подход важен для проверки моделей разрушения как пластичных (например, титановые сплавы), так и хрупких (например, керамика) материалов.

Широкий диапазон скоростей удара позволяет детально исследовать релаксационные свойства и переход от начальных повреждений к разрушению. В исследовании также проводится сравнительный анализ различных методов вейвлет-преобразования (рисунок 2), что позволяет оптимизировать обработку сигналов PDV и повысить точность полученных профилей скорости.

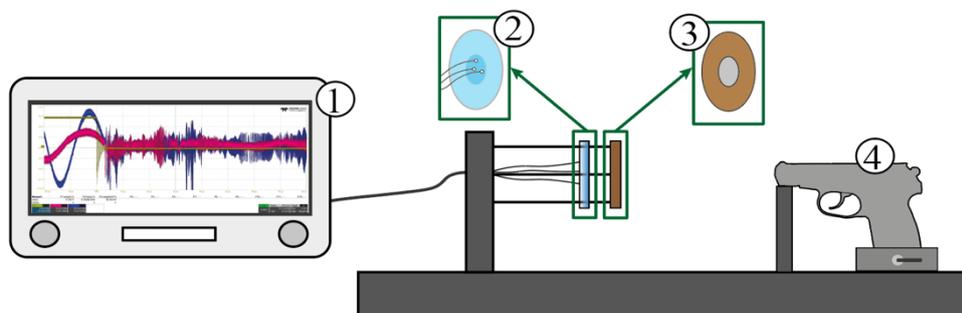


Рис. 1. - Экспериментальная установка

В состав экспериментальной установки входят: 1 — осциллограф, 2 — коллиматоры, 3 — образец, 4 — газобаллонный пистолет. В качестве источника удара использовался пистолет Макарова с калибром 4.5 мм и скоростью пули 110 м/с. В методе PDV также использовались оптическое волокно, циркулятор и фотодетектор.

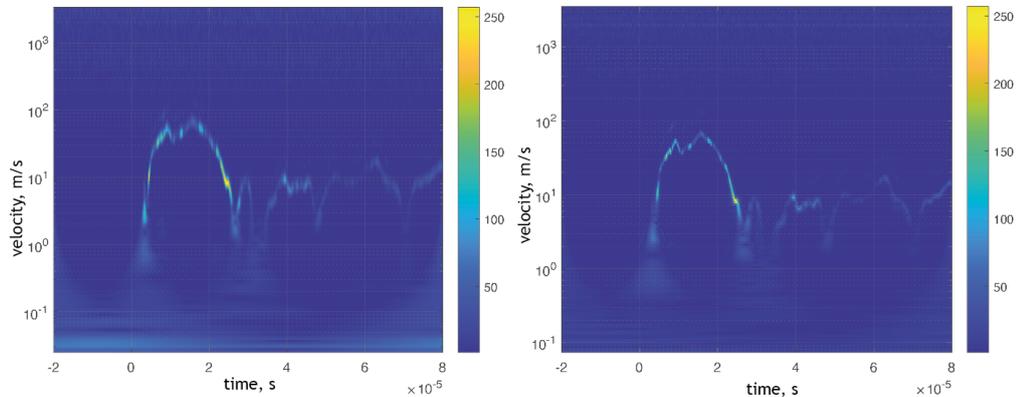


Рис. 2. - Сравнение результатов обработки сигналов с использованием функции Морле и ударной функции

На рисунке 2 видно, что обработка с применением ударной функции менее шумная, поскольку она лучше соответствует быстро меняющимся частотам сигнала PDV.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.8.2.

Литература

1. Dolan D. H. Extreme measurements with photonic Doppler velocimetry (PDV), Review of Scientific Instruments **91** (2020)
2. Etemadi E., Zamani J., Jafarzadeh M. Physical constitutive equations for plastic deformation of FCC metals subjected to high strain rate loading, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications **232**, 106-120 (2018)

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА 42ХНМ НА СВЕРХМНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Уваров С.В, Банников М.В. Оборин В.А.

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

Сплав 42ХНМ применяется в атомной энергетике в трубопроводах высокого давления [1]. Рабочая температура может достигать 300 °С при наличии вибрационных и термоциклических нагрузок. Для оценки возможности гарантированной эксплуатации на протяжении 60 лет была поставлена задача испытать образцы из указанного сплава в условиях сверхмногоциклового (до 10^{10} циклов) усталости при указанной температуре.

Особенность проведения испытаний заключается в том, что образец сам может нагреваться до достаточно высоких температур. При этом процесс тепловыделения не постоянен во времени (Рис. 1)

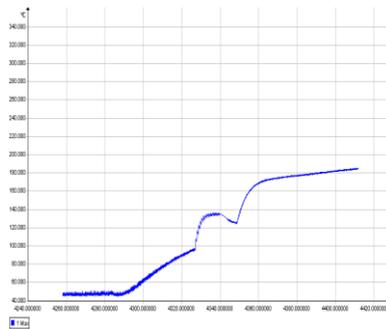


Рис. 1. – Изменение температуры образца в отсутствии внешнего нагрева

Вследствие этого для поддержания постоянной температуры испытаний необходимо контролировать температуру рабочей зоны образца и изменять интенсивность нагрева так, чтобы она оставалась в пределах допуска. Также сплав 42ХНМ является немагнитным, следовательно потери на перемагничивание в нём достаточно малы, что потребовало создания установки индукционного нагрева с повышенной (240 кГц) частотой.

Контроль температуры выполнялся с помощью поверенного инфракрасного пирометра ОРТСТ4MLCFB3: Инфракрасный термометр, стационарный с рабочим диапазоном 0-500 °С в центральной точке образца. Также температура контролировалась инфракрасной камерой Flir Cedit Silver для определения градиента температуры по всей поверхности образца (Рис. 2) Поскольку для корректной работы нагружающей машины требовался отвод тепла, верхний край образца, закреплённый резьбовым соединением к испытательной машине имел температуру 140-150 градусов. Свободный торец образца из-за отсутствия отвода тепла в процессе испытаний нагревался до температуры 320-330 градусов. Центральная часть образца, в которой наблюдались максимальные значения приложенных напряжений, поддерживалась в температурном диапазоне 300-315 градусов Цельсия.

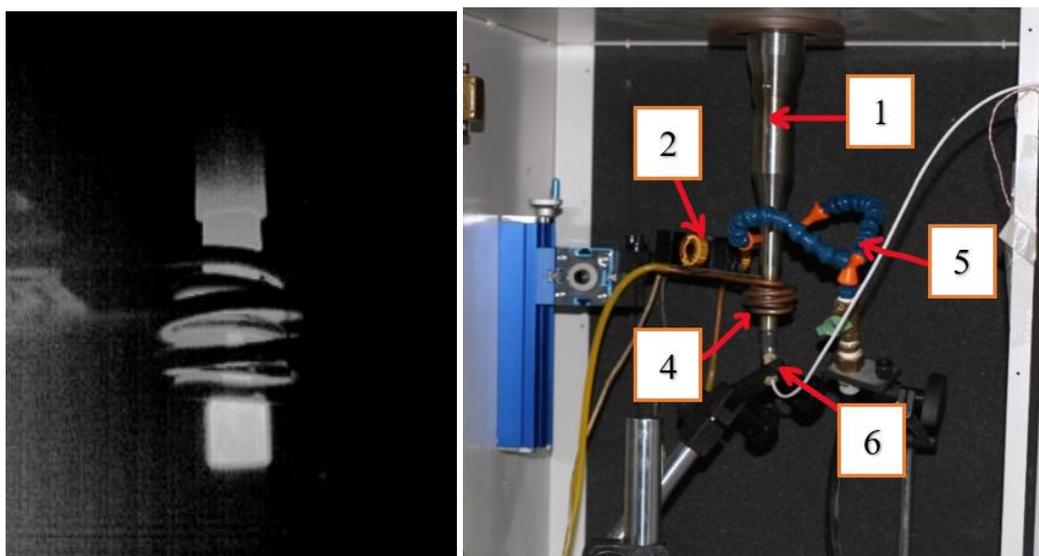


Рис. 2. – Инфракрасное изображение образца в процессе испытаний и вид нагружающей установки. 1 – хорн ультразвуковой испытательной машины, 2 – генератор ТВЧ, 4 – индукционная катушка с водяным охлаждением, 5 – охлаждение хорна, 6 – пирометр.

Созданная экспериментальная установка позволила выполнить работы по испытанию указанного сплава а также может быть использована для испытаний иных жаропрочных сплавов, например применяемых в авиастроении.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.8.3.

Литература

1. Гурович А.С., Фролов Д.А., Мальцев Е.А., Кулешова С.В., Федотова И.В., Федотов Б.А. Фазовые превращения в облученном сплаве 42ХНМ после отжигов при повышенных температурах, а также после быстрого отжига, имитирующего условия максимальной проектной аварии. – URL: http://www.niiar.ru/sites/default/files/safety20/10_2019-_42hnm-gurovich_niiar.pdf (дата обращения 3.11.2022)

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СИНЕРГИИ НА ПРОЧНОСТЬ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ ОТ ЛОКАЛЬНОГО И ОБЩЕГО ОТКЛОНЕНИЯ ВОЛОКОН В МОНОСЛОЯХ

Дубовиков Е.А., Шаныгин А.Н.

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

Выполнено многопараметрическое численное исследование деформирования и повреждения высоконагруженных про-бионических конструкций, направленное на получение максимальной положительной синергетики на микроуровне от взаимодействия волокон и связующего за счет выбора оптимальных значений параметров связующего и волокон для зон с различным уровнем нагружения.

В рамках данной работы предметом исследования стал анализ зависимости положительной синергии от взаимодействия волокон и связующего в монослое для слоистых композитных пакетов. Рассматривались локальные и групповые отклонения волокон от оси армирования в монослое [1]. Для решения поставленной задачи в работе исследована зависимость уровня концентрации напряжений в связующем и снижения по этой причине прочности композитного пакета от отклонения ориентации отдельного волокна и группы волокон от оси ориентации монослоя. Исследования проводились с использованием автоматизированной параметрической прочностной модели фрагмента слоистого ПКМ на микроуровне [2,3] на основе метода конечных элементов (МКЭ) в двумерной постановке, позволяющей определить концентрации напряжений в связующем при растяжении монослоя в направлении ориентации волокон. В рамках МКЭ модели фрагмента слоистого ПКМ волокна моделировались цилиндрическими телами с ортотропными свойствами, а связующее моделировалось изотропным однородным материалом (рисунок 1).

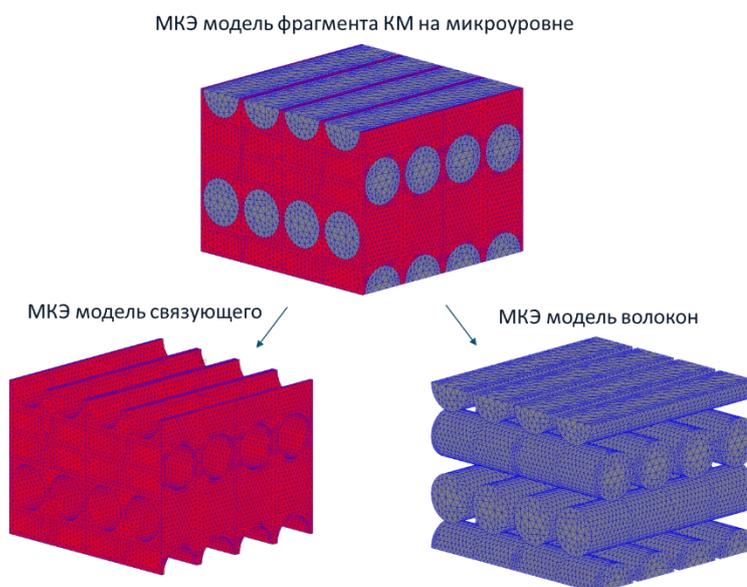


Рисунок 1 – Автоматизированная параметрическая прочностная модель фрагмента слоистого ПКМ на микроуровне

Полученные результаты позволяют обосновать причину снижения допустимого уровня напряжений в монослое, обусловленного рядом технологических дефектов, таких как неравномерное распределение волокон, локальные и групповые искривления волокон, а также критические факторы, снижающие прочность композитного многослойного пакета, обусловленные межслойными взаимодействиями.

Исследовано влияние положительной синергии от взаимодействия волокон и связующего от ряда параметров, таких как угол отклонения волокон, объемное содержание волокон и значение предельной деформации связующего. Показано, что положительная синергия такого взаимодействия, состоящая в максимальном включении связующего и волокна в восприятие сил, приводит к значительному снижению концентраций в связующем, что положительно сказывается на долговечности конструкции из-за снижения деградации на микроуровне. Показано, что положительная синергия реализуется не только при нулевых углах, но и при некоторых небольших углах отклонения волокон от оси монослоя.

При этом величина положительной синергии существенно зависит от значений конструктивных параметров монослоя, перечисленных выше.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.2.2.

Литература

1. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов – Киев: Наукова думка, 1985. – 302 с.
2. E. Dubovikov, V. Fomin, D. Fomin, V. Notkin, N. Perchits, G. Vodovozov Numerical investigation of influence of initial damages on strength parameters of CFRP // Proceedings of the 31th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2018). — 2018.
3. Дубовиков Е.А. Многоуровневый алгоритм оценки перспективных конструктивно-силовых схем композитных авиаконструкций : дис. канд. техн. наук : 05.07.03 / Дубовиков Евгений Аркадьевич. – Жуковский, 2017. – 130 с.

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА МЕЗОУРОВНЕ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОМПЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК С ПРО-БИОНИЧЕСКИМИ КСС

Марескин И.В.

*Центральный аэрогидродинамический институт им. Проф. Н.Е.
Жуковского*

Проведены многопараметрические численные исследования деформирования и повреждения высоконагруженных про-бионических конструкций, направленные на получение максимальной положительной синергетики на мезоуровне при взаимодействии слоев за счет использования волокон в конструкциях специальных кольцевых стяжек для повышения устойчивости осесимметричных стержневых композитных/металло-композитных элементов (См. рис. 1) [1].

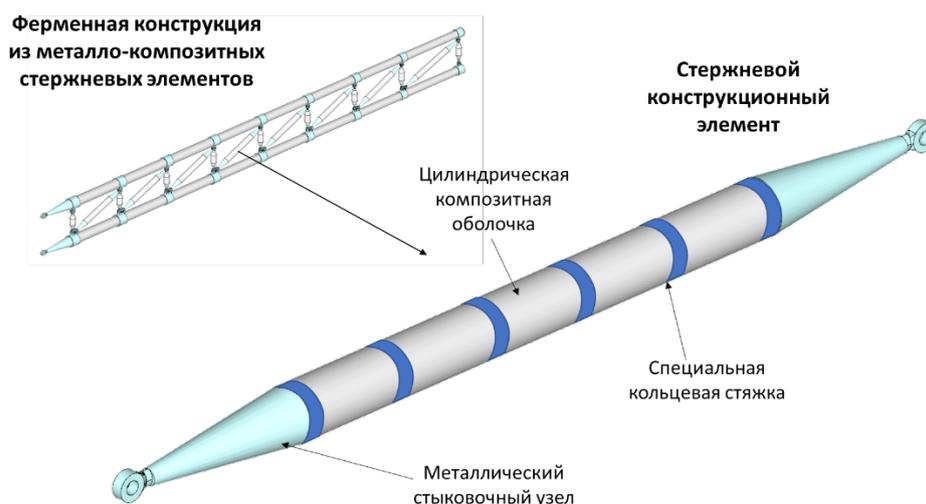


Рис. 1. – Основные части стержневого конструкционного элемента

Целью данного исследования был поиск областей рациональных значений конструктивных параметров высоконагруженной трубчатой цилиндрической композитной оболочки, обеспечивающих максимальный положительный синергетический эффект на мезоуровне от взаимодействия оболочки и специальных кольцевых стяжек. Такие оболочки являются основой осесимметричных стержневых конструктивных элементов, из которых может быть сформирована высокопрочная и легкая ферменная конструкция. Из-за большой кривизны цилиндрической оболочки волокна в слоях, имеющих даже небольшие углы с осью оболочки, имеют значительное искривление (См. рис. 2) и по этой причине склонны к потере устойчивости, следствием чего могут быть расслоения структуры оболочки с последующим разрушением. Основной задачей в рамках реализации, указанной выше цели исследований, была оценка влияния межслоевого взаимодействия в композитной оболочке на ее прочностные и жесткостные характеристики с учетом и без учета специальных кольцевых стяжек.

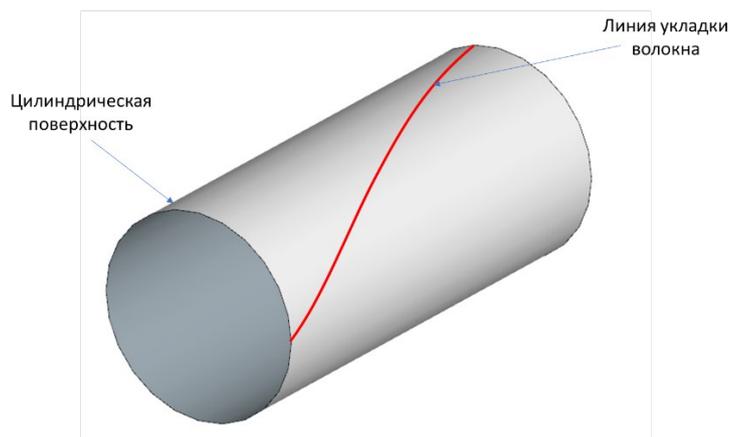


Рис. 2. – Искривление волокон цилиндрической оболочки

При решении данной задачи рассматривались несколько вариантов данных специальных кольцевых стяжек, отличающиеся процентным содержанием и свойствами связующего в них. Исследования проводились с использованием параметрических конечно-элементных моделей. Результаты, полученные в рамках конечно-элементного моделирования оболочки, были уточнены с учетом экспериментальных данных, полученных из открытых источников.

В результате проведенных исследований показано, что взаимодействие оболочки с кольцевыми стяжками приводит к положительной синергетике не только с точки зрения увеличения несущей способности стержневого элемента, но и с точки зрения увеличения его ударной прочности, так как специальные стяжки поглощают и перераспределяют часть энергии ударных воздействий [2].

В данной работе также была проведена оценка влияния кольцевых стяжек на характер межслоевого взаимодействия в цилиндрической оболочке с точки зрения появления концентраций напряжений и выбора рациональных значений параметров оболочки.

Результаты исследований, полученные в настоящей работе, могут быть полезны при проектировании легких и надежных композитных конструкций во многих отраслях машиностроения и строительной индустрии

Работа подготовлена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.2.3.

Литература

1. Кондаков И.О., Марескин И.В., Миргородский Ю.С., Чернов А.В., Шаньгин А.Н., Композитный стержневой конструкционный элемент, патент РФ на изобретение № 2724035, 2020.
2. K.D. Potter, F. Schweickhardt, M.R. Wisnom, Impact response of unidirectional carbon fibre rod elements with and without an impact protection layer, Journal of Composite Materials, Vol. 34, No.17, 2000

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПОВРЕЖДЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРО-БИОНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ

Миргородский Ю.С.

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

Выполнено многопараметрическое численное исследование деформирования и повреждения высоконагруженных про-бионических конструкций, направленное на получение максимальной положительной синергетики на локальном уровне за счет создания специальных стыков для металло-композитных деталей / отсеков между собой.

Проведенные исследования позволили решить ряд критических задач по обеспечению прочности композитных и металло-композитных конструкций в рамках про-бионических КСС, в которых реализуется нелинейное поведение конструкции и материала.

В работе представлены некоторые результаты проведенных расчетных исследований по:

1. анализу прочности металло-композитных стыков [1,2];
2. анализу нелинейного поведения композитных гермошпангоутов, состоящих из полужестких 3D обшивок и жесткого каркаса;
3. Оценке жесткостных характеристик полужестких композитных обшивок для передачи распределенных нагрузок на дискретные элементы конструкции.

- ▶ Эластичная волнообразная внутренняя обшивка
- ▶ Сетчатая (реберная) конструкция
- ▶ Легкий защитный наполнитель
- ▶ Наружная (аэродинамическая) гибкая обшивка

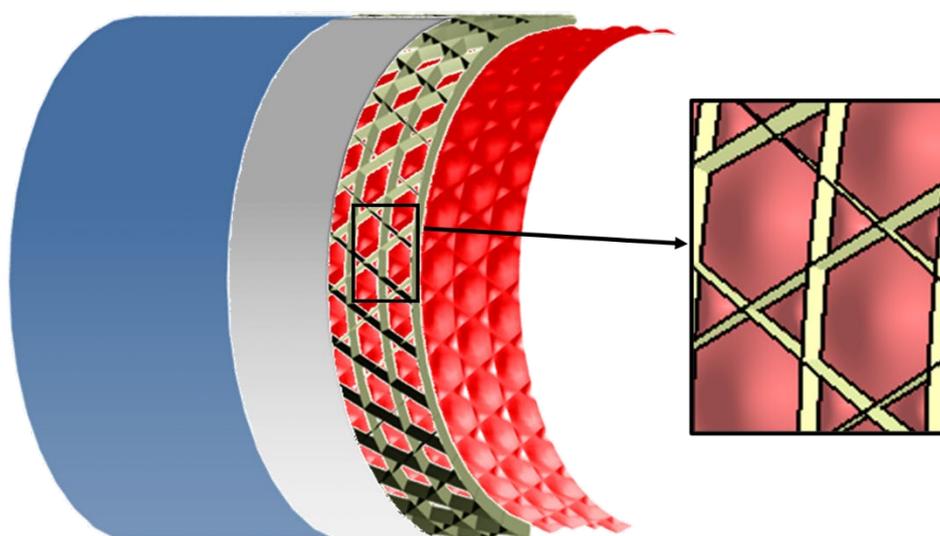


Рис. 1. – Сетчатый композитный отсек с защитой и полужесткой обшивкой для передачи наддува

Данные исследования проводились с использованием инженерного метода, который позволяет учитывать геометрическую нелинейность конструкции при нагружении и

нелинейное поведение материала. Метод основан на редуцировании жесткостных характеристик материала с использованием заданных диаграмм материала (Рисунок 2) на растяжение, сжатие и пр. Геометрическая нелинейность моделируется перестроением начальных положений узлов элемента и созданием «внутренних» сил. Представленный метод автоматизирован [3] и позволяет оценить остаточные деформации конструкции после «снятия» нагрузки.

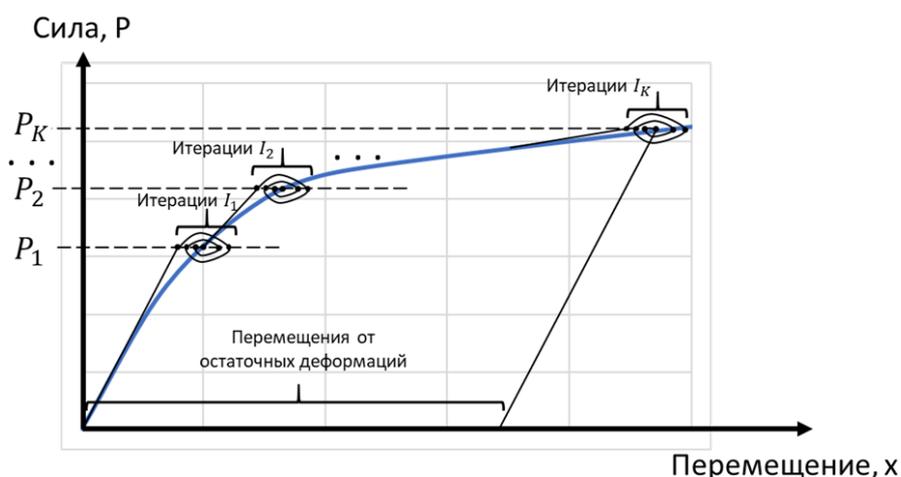


Рис. 2. – График нагружения пошагового нагружения с итерациями на каждом шаге

Предложена концепция развитие метода, его валидация экспериментальными исследованиями с использованием метода видеограмметрии (цифровой корреляции изображения), оптоволоконных систем и тензометрии.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.2.4.

Литература

1. Дубовиков Е.А., Кондаков И.О., Марескин И.В., Фомин Д.Ю., Шаныгин А.Н., "Узел стыка отсеков фюзеляжа с сетчатой и традиционной конструктивно-силовыми схемами", Патент РФ на изобретение №2655585, 2018
2. Andrey Chernov, Danil Fomin, Ivan Kondakov , Ivan Mareskin and Alexander Shanygin. Lightweight and reliable metal–composite joints based on harmonization of strength properties of joined parts. // Proc IMechE Part G: J Aerospace Engineering, 2018, Vol. 232(14) 2663–2672, DOI: 10.1177/0954410018778797
3. Миргородский Ю.С., Шаныгин А.Н., Дубовиков Е.А., Марескин И.В., Фомин Д.Ю. «Программа для оперативного уточнения параметров НДС в зоне контакта металлических и композитных частей высоконагруженного металло-композитного стыка», Программа для ЭВМ №2024668677

ИССЛЕДОВАНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТАЛЛО-КОМПОЗИТНЫХ СТЫКОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ, ЖЕСТКОСТНЫХ И ВЕСОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Фомин Д.Ю.

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

Проведено многопараметрическое численное исследование деформирования и повреждения высоконагруженных про-бионических конструкций, направленное на получение максимальной положительной синергетики на глобальном уровне за счет создания специальных стыков для металло-композитных деталей / отсеков между собой.

В работе проведены исследования по анализу прочности нового поколения металло-композитных стыков в зависимости от значений основных конструктивных параметров с целью поиска их рациональных значений для повышения прочности и снижения веса стыков. В отличие от исследований, проведенных в ряде работ по данной теме [1][2], в настоящей работе решалась концептуальная задача по исследованию взаимного влияния компонентов стыковочных узлов друг на друга с целью подбора рациональных пар. Рассмотрены два типа стыков для сетчатых и ферменных металло-композитных конструкций, реализующих принцип соединений типа волокно-металл вместо традиционного – волокно-связующее-металл. В качестве альтернативных компонентов стыкующихся пар рассматривались конструкции на основе метаматериалов с переменными жесткостными характеристиками (См. рис. 1).

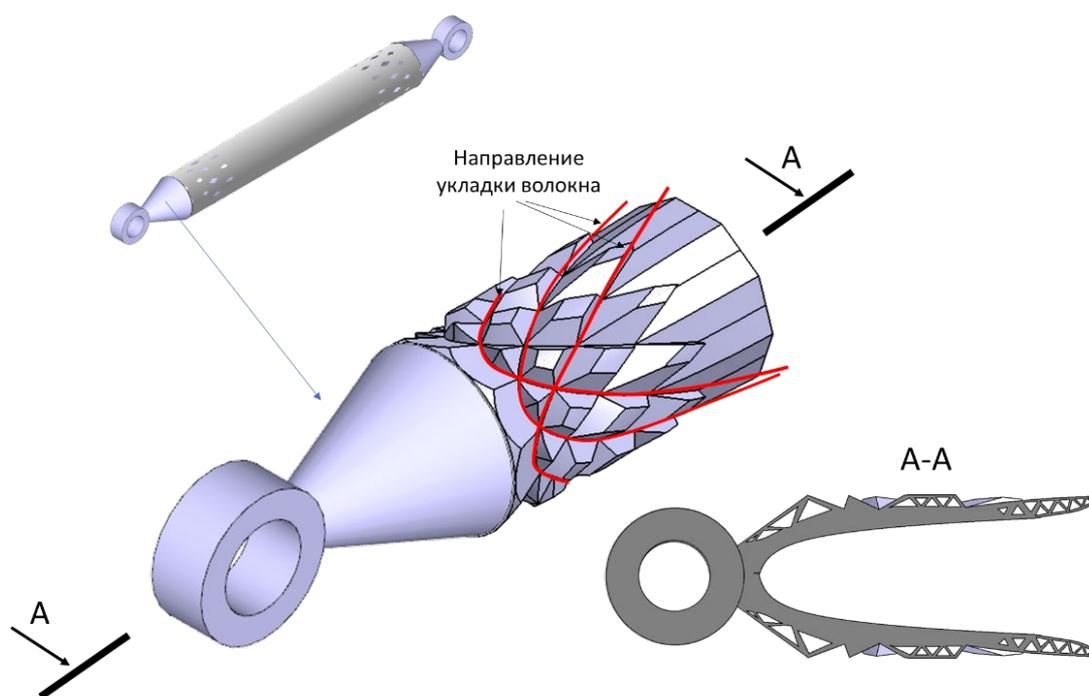


Рис. 1. – Стыковочный узел для ферменной конструкции

При решении данной задачи одним из критериев рациональности рассматривался положительный синергетический эффект от взаимодействия основных компонентов стыков в создании не только более прочной стыковочной пары, но и повышении жесткостных и весовых характеристик частей конструкции, не входящих в зону стыков.

Данная задача рассматривалась в рамках многоуровневого алгоритма, разработанного в ЦАГИ для решения междисциплинарных задач на начальной стадии проектирования. В основе алгоритма лежит принцип вложенности моделей конструкции различных уровней и принцип глобальной параметризации, используемый при построении и анализе прочностных и нагрузочных моделей.

Работа подготовлена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.2.5.

Литература

1. И.О. Кондаков, А.Н. Шаныгин, И.В. Марескин, Д.В. Ведерников, М.А. Кудров, Принципы создания легких металло-композитных стыковочных узлов на основе механических метаматериалов для перспективных авиаконструкций. Труды МФТИ. Том 10, №1, 2018
2. A. Chernov, D. Fomin, I. Kondakov, I. Mareskin, A. Shanygin, Lighthweight and reliable metal-composite joints based on harmonization of strength properties of joined parts. Journal of Aerospace Engineering, April, 2018. <https://doi.org/10.1177/0954410018778797>

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕГКИХ И НАДЕЖНЫХ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОБИОНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ЧЕТЫРЕХ УРОВНЯХ СТРУКТУРНОЙ ДЕТАЛИЗАЦИИ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

Шаныгин А.Н.

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

В работе на основе численных расчетов и анализа результатов проведенных в ряде российских и зарубежных проектов сформулирован и обоснован ряд факторов и их суперпозиция, критически влияющие на прочность композитных конструкций. К таким факторам отнесены четыре типа сочленений конструктивных элементов между собой на различных уровнях структурной детализации типовых композитных конструкций. Данные сочленения, порождают структурные нерегулярности и обуславливают возникновение концентраций напряжений на следующих уровнях:

- микроуровень – масштаб $10^{-6} \div 10^{-5}$ м (взаимодействие связующего с отдельными волокнами);
- мезоуровень – масштаб $10^{-4} \div 10^{-3}$ м (взаимодействие между собой слоев композитного пакета);
- локальный уровень – масштаб $10^{-2} \div 10^{-1}$ м (взаимодействие обшивки с подкрепляющим набором);
- глобальный уровень – масштаб $10^0 \div 10^1$ м (взаимодействие деталей/отсеков между собой в зонах стыка) (См. рис. 1).

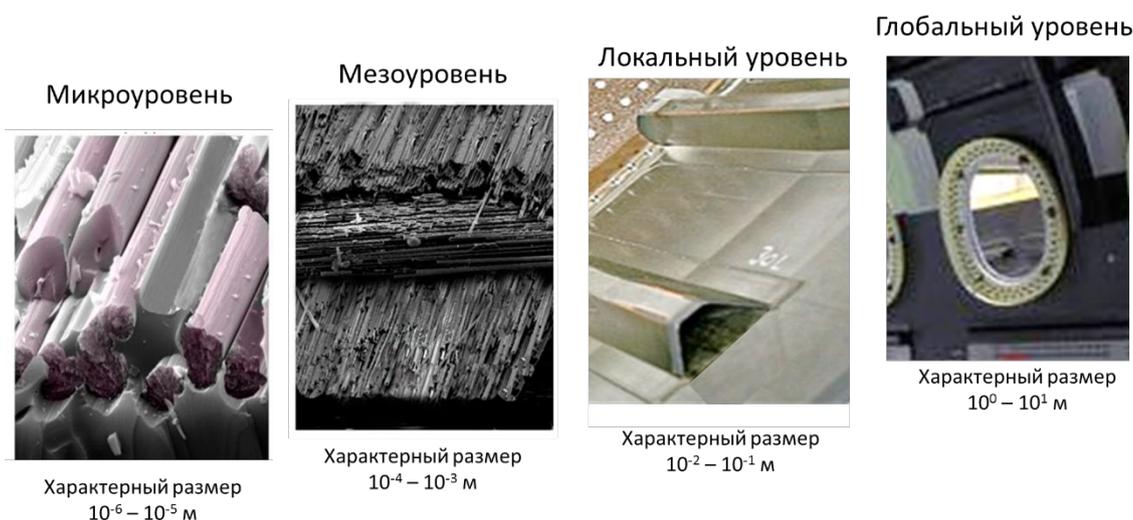


Рис. 1. – Основные уровни концентраций напряжений в связующем

Показано, что суперпозиция концентраций напряжений в связующем, порождаемая описанными выше структурными нерегулярностями, может достигать до 200% и более от значений общего НДС, традиционно используемого для оценки прочности конструкции.

В данной работе на основе результатов расчетных исследований и анализа материалов исследований на данную тему [1][2][3] проведен анализ зависимости величин концентрации напряжений в связующем на всех четырех уровнях структурной нерегулярности от значений базовых параметров, определяющих механические сочленения элементов конструкции между собой.

В работе приведен ряд решений по снижению уровней концентраций напряжений в связующем на рассмотренных выше уровнях детализации, позволяющих получить для нового поколения композитных конструкций. Показано, что для конструкций, сформированных на основе про-бионических КСС за счет положительной синергии от взаимодействия компонентов, входящих в состав стыкуемых пар, на всех четырех рассмотренных уровнях детализации могут быть реализованы лучшие весовые, прочностные и эксплуатационные характеристики для ряда авиационных, автомобильных и строительных конструкций.

Помимо конструктивных решений, направленных на снижение уровней концентраций в стыкуемых парах на всех уровнях детализации конструкции, в работе представлены результаты получения положительной синергии от наличия в конструкции встроенной системы мониторинга технического состояния на основе волоконно-оптических датчиков деформаций. Показано, что наличие такого мониторинга позволяет более эффективно решать проблемы обеспечения прочности для предложенных конструктивных решений по снижению концентраций напряжений в конструкции, следствием чего будет снижение требований по дополнительным запасам прочности, обусловленным наличием таких концентраторов и повышение весовой эффективности конструкции.

Результаты данной работы могут быть полезны для проектирования нового поколения композитных и металло-композитных конструкций на основе про-бионических принципов, позволяющих получать легкие и надежные в эксплуатации металло-композитные конструкции.

Работа подготовлена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.2.6.

Литература

1. Дубовиков Е.А., Многоуровневый алгоритм оценки перспективных конструктивно-силовых схем композитных авиаконструкций, Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., ЦАГИ, г. Жуковский, 2017
2. O.T. Thomsen, K.K. Kratmann, Experimental Characterisation of Parameters Controlling the Compressive Failure of Pultruded Unidirectional Carbon Fibre Composites, Applied Mechanics and Materials, Vols. 24-25, pp 15-22, 2010
3. A. Chernov, D. Fomin, I. Kondakov, I. Mareskin, A. Shanygin, Lighthweight and reliable metal-composite joints based on harmonization of strength properties of joined parts. Journal of Aerospace Engineering, April, 2018. <https://doi.org/10.1177/0954410018778797>

КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Сенин А.Н.

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

Современные элементы конструкций на основе пластин и оболочек эксплуатируются в условиях интенсивных внешних воздействий различной природы. Механические, температурные, центробежные, аэро- и гидродинамические нагрузки приводят к возникновению напряжённо-деформированного состояния, существенно влияющего на динамические характеристики и поведение упругих тел. На сегодняшний день активно развивается направление, связанное с созданием smart-систем. Их ключевой особенностью является наличие сенсоров и актуаторов, позволяющих изменять геометрические, механические или динамические характеристики конструкции в зависимости от состояния окружающей среды и внешних воздействий. Одним из возможных вариантов построения таких smart-систем является использование пьезоэлектрических материалов [1, 2]. В литературе представлены разные подходы для численного моделирования тонкостенных конструкций на основе пьезоэлектриков [3, 4]. Несмотря на большое количество технических приложений, в которых при анализе динамического поведения электроупругих пластин и оболочек необходимо учитывать предварительные (начальные) напряжения, исследования по данной тематике весьма ограничены.

В ходе выполнения работ по данному направлению сформулирована математическая постановка и разработан конечно-элементный алгоритм решения задачи о собственных колебаниях электроупругих пластин и оболочек, находящихся под действием статической нагрузки. Криволинейная поверхность тонкостенной конструкции при моделировании представляется в виде совокупности плоских сегментов. В каждом из них выполняются соотношения классической теории слоистых пластин и теории электроупругости, записанные для случая плоского напряжённого состояния. Деформации определяются с использованием нелинейных уравнений, которые линеаризуются относительно состояния с малым отклонением от положения начального равновесия, вызванного воздействием статических механических и электрических сил. Полученное после этой операции вариационное уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} & \int_S (\delta \boldsymbol{\varepsilon}_1^*)^T \boldsymbol{\Theta} \boldsymbol{\varepsilon}_1^* dS + \int_S (\delta \boldsymbol{\varepsilon}_1^*)^T \boldsymbol{\Theta} \mathbf{S}_0 \mathbf{s}_1 dS + \int_S \delta \mathbf{s}_1^T \mathbf{S}_0^T \boldsymbol{\Theta} \boldsymbol{\varepsilon}_1^* dS + \int_S \delta \mathbf{s}_1^T \mathbf{S}_0^T \boldsymbol{\Theta} \mathbf{S}_0 \mathbf{s}_1 dS + \int_S \delta \mathbf{s}_1^T \mathbf{X}_0^e \mathbf{s}_1 dS + \\ & + \int_S \delta \mathbf{s}_1^T \mathbf{X}_0^s \mathbf{s}_1 dS + \int_S (\delta \boldsymbol{\varepsilon}_1^*)^T \mathbf{G} \mathbf{B}_\psi \boldsymbol{\psi}_1 dS + \int_S \delta \mathbf{s}_1^T \mathbf{S}_0^T \mathbf{G} \mathbf{B}_\psi \boldsymbol{\psi}_1 dS + \int_S \delta \mathbf{s}_1^T \mathbf{X}_0^E \mathbf{s}_1 dS + \\ & + \int_S \delta (\mathbf{B}_\psi \boldsymbol{\psi}_1)^T \mathbf{G}^T \boldsymbol{\varepsilon}_1^* dS + \int_S \delta (\mathbf{B}_\psi \boldsymbol{\psi}_1)^T \mathbf{G}^T \mathbf{S}_0 \mathbf{s}_1 dS - \delta \boldsymbol{\psi}_1^T \mathbf{C} \boldsymbol{\psi}_1 - \omega^2 \int_S \delta \mathbf{u}_1^T \mathbf{J} \mathbf{u}_1 dS = 0. \end{aligned}$$

В этом выражении нижние индексы «0» и «1» соответствуют начальному равновесному состоянию и малому отклонению от него: $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ — вектор, содержащий линейную часть деформаций; $\boldsymbol{\Theta}$ — матрица упругих постоянных; \mathbf{S} — матрица линейных множителей; \mathbf{s} — вектор, содержащий компоненты тензора деформаций; $\mathbf{B}_\psi = \text{diag}\{1/h^{(1)}, 1/h^{(2)}, \dots, 1/h^{(N)}\}^T$, где $h^{(n)}$ — толщина n -го пьезоэлектрического слоя (элемента); \mathbf{G} — матрица, содержащая

пьезоэлектрические константы; $\psi = \{\psi^{(1)}, \psi^{(2)}, \dots, \psi^{(M)}\}^T$ — вектор разности потенциалов для каждого пьезоэлектрического слоя; ω — собственная частота колебаний; \mathbf{u} — вектор перемещений; \mathbf{J} и \mathbf{C} — матрицы инерции и ёмкостей пьезоэлектрических слоёв. Элементы матриц \mathbf{X}_0^e , \mathbf{X}_0^s и \mathbf{X}_0^E находятся из решения нелинейной статической задачи с соответствующими граничными условиями. Более подробно вид некоторых матриц приведён в статье [5].

Решение задачи о собственных колебаниях с учётом предварительного напряжённого и деформируемого состояния, вызванного действием статических силовых и электрических факторов, осуществляется методом конечных элементов. После выполнения его известных процедур собственные частоты и формы колебаний находятся с помощью неявно перезапускаемого метода Арнольди. При решении нелинейной статической задачи используется метод Ньютона–Рафсона. С целью повышения вычислительной эффективности и снижения вероятности получения нефизических результатов нагрузка задаётся последовательными приращениями.

В примерах рассмотрены прямоугольная пластина и круговая цилиндрическая оболочка с пьезоэлементом, нагруженные равномерным давлением. Достоверность решения подтверждена сравнением перемещений и собственных частот колебаний с экспериментальными данными (Рис. 1) и результатами, полученными в коммерческом пакете конечно-элементного моделирования ANSYS (Рис. 2). В первом случае объектом исследования выступает жёстко закреплённая по всем краям прямоугольная пластина без пьезоэлемента, нагруженная равномерным давлением. Результаты решения статической задачи в линейной постановке (малые деформации) описывают экспериментальные данные лишь при прогибах, не превышающих толщину пластины. Количественное и качественное совпадение в пределах относительной погрешности $\pm 5\%$ достигается только при использовании нелинейных геометрических соотношений.

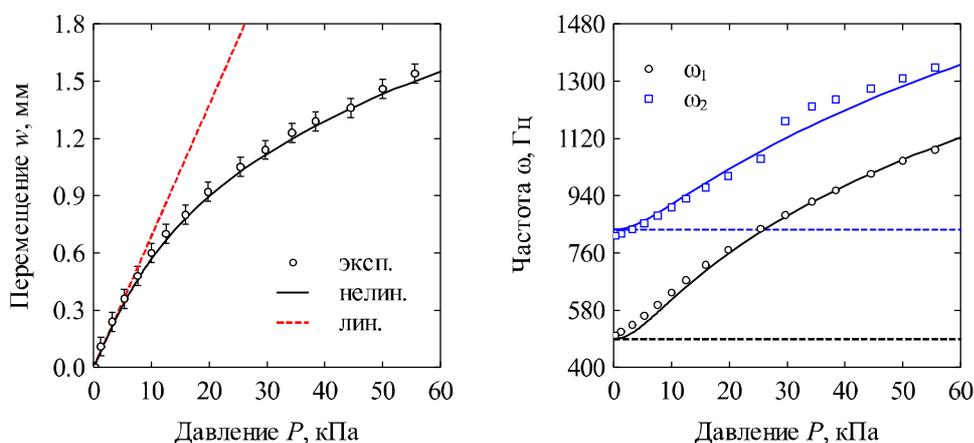


Рис. 1. Изменение перемещений (слева) и собственных частот колебаний (справа) от давления. Линии — расчёт с помощью разработанного конечно-элементного алгоритма, маркеры — эксперимент

Во второй группе примеров рассмотрена жёстко закреплённая на обоих краях цилиндрическая оболочка с пьезоэлементом. Приведённые на Рис. 2 зависимости, полученные в пакете ANSYS и с помощью разработанного конечно-элементного алгоритма, качественно совпадают, а их количественное различие не превышает относительной погрешности 3%. Некоторые из кривых имеют изломы, которые вызваны сменой формы колебаний у отслеживаемой частоты. Расчёты, проведённые при разной степени дискретизации, показали, что используемый конечный элемент обладает хорошей сходимостью на грубых сетках за счёт использования в качестве функций формы для изгибных перемещений несовместных кубических полиномов Эрмита.

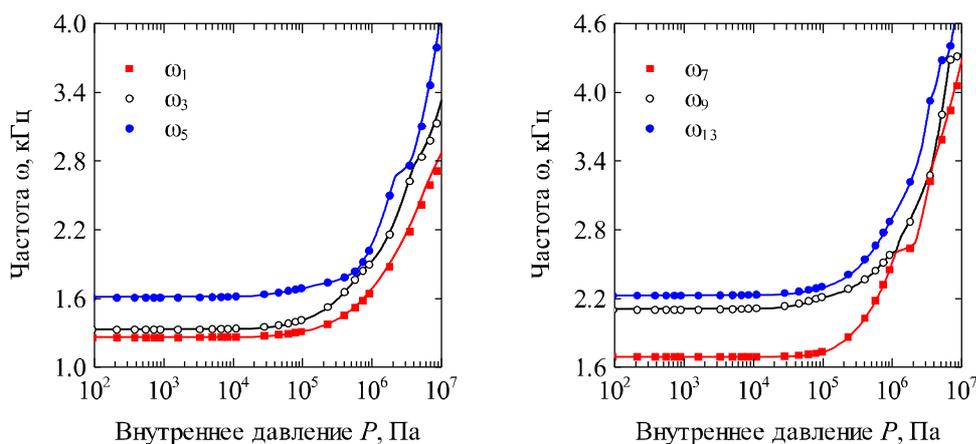


Рис. 2. Зависимость собственных частот колебаний круговой цилиндрической оболочки с пьезоэлементом от внутреннего давления: сплошные линии — ANSYS, маркеры — текущее решение

С помощью разработанного конечно-элементного алгоритма оценено влияние внутреннего давления на перемещения и собственные частоты колебаний прямоугольных пластин и цилиндрических оболочек с пьезоэлементами различных размеров. Рассмотрены разные варианты граничных условий, задаваемые на краях конструкции. Представленная математическая модель и численный алгоритм получают дальнейшее развитие с целью их применения в задачах активного и пассивного демпфирования колебаний тонкостенных конструкций, которые в реальных условиях эксплуатации находятся под воздействием механических нагрузок различной природы.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задачи № 1.3.1 и № 1.3.2.

Литература

1. Fleming A.J., Moheimani S.O.R. Piezoelectric transducers for vibration control and damping, 1st ed. London: Springer, 2006. 287 p. doi: [10.1007/1-84628-332-9](https://doi.org/10.1007/1-84628-332-9)
2. Gripp J.A.B., Rade D.A. Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review // Mech. Syst. Signal Process. 2018. Vol. 112. P. 359–383. doi: [10.1016/j.ymssp.2018.04.041](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.04.041)
3. Benjeddou A. Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey // Comput. Struct. 2000. Vol. 76, No. 1–3. P. 347–363. doi: [10.1016/S0045-7949\(99\)00151-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(99)00151-0)
4. Zhang S-Q., Zhao G-Z., Rao M.N., Schmidt R., Yu Y-J. A review on modeling techniques of piezoelectric integrated plates and shells // J. Intell. Mater. Syst. Struct. 2019. Vol. 30, No. 8. P. 1133–1147. doi: [10.1177/1045389X19836169](https://doi.org/10.1177/1045389X19836169)
5. Lekomtsev S.V., Matveenko V.P., Senin A.N. Passive damping of vibrations of plates and cylindrical shells interacting with a flowing fluid using piezoelectric elements // Mech. Adv. Mater. Struct. 2024. Vol. 31, No. 1. P. 164–180. doi: [10.1080/15376494.2023.2272399](https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2272399)

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ С АКТУАТОРАМИ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П.

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

Поиск новых сценариев использования smart-материалов при проектировании современных конструкций является перспективным научным направлением на сегодняшний день. Одной из задач является создание систем с поведением подобным живому организму, которые способны самостоятельно «ощущать» внешние воздействия различной природы и реагировать на них, меняя свою геометрию или характеристики. Наиболее распространёнными устройствами, используемыми для этих целей, являются серво- и гидроприводы. Они способны обеспечить достаточный уровень точности и создать необходимые усилия. Однако жёсткие требования по габаритам и массе, свойственные аэрокосмической отрасли, накладывают существенные ограничения на их применение. В этом контексте использование механических актуаторов на основе проволоки из сплава с памятью формы (СПФ) выглядит весьма перспективным.

Эффект памяти формы заключается в свойстве определённых сплавов осуществлять фазово-структурный переход под воздействием температурной нагрузки. Наиболее известным представителем СПФ является семейство никель-титановых сплавов с ярко выраженным эффектом памяти формы и псевдоупругости. Обратимые неупругие деформации, возникающие при полном переходе, достигают 5–8%, а развиваемые усилия могут разрушить сам материал [1]. Температурный диапазон аустенитно-мартенситных превращений достаточно широк и сильно зависит от массовой доли каждого компонента никель-титанового сплава, что позволяет подобрать его практически для любого сценария использования. Ещё одно неочевидное преимущество СПФ заключается в том, что они обладают достаточно большим удельным сопротивлением (более чем в 45 раз выше меди), что позволяет их нагревать с помощью электрического тока. Тем не менее, существуют и весьма серьёзные недостатки: дороговизна, трудности с предсказанием неупругих деформаций и усилий при незавершённом аустенитно-мартенситном переходе, невысокая скорость реагирования (около 1 с), высокая технологичность изготовления. Резюмируя вышесказанное, никель-титановые сплавы с памятью формы обладают потенциалом для их применения в качестве перспективных актуаторов, но для обоснования целесообразности их использования требуется предварительное исследование и численное моделирование.

В данной работе сформулированы общие рекомендации для применения в качестве актуатора проволоки из СПФ и численно продемонстрированы его возможности. Поведение проволочных элементов является наиболее стабильным благодаря технологии изготовления (волочение). Использование двумерных и трёхмерных изделий затруднительно по причине трудоёмкости механической обработки никель-титанового сплава, в процессе которой накапливаются непредсказуемые деформации и напряжения, влияющие на его дальнейшее поведение. Так как в реальных условиях сложно задать точное значение неупругой деформации в СПФ при незавершённом фазово-структурном переходе, то ограничимся рассмотрением только двух состояний в процессе управления. В первом из них актуатор находится полностью в мартенситном (растянутом) состоянии, а во втором — в аустенитном (сжатом). В таком случае можно пренебречь всеми промежуточными процессами фазово-структурного перехода и моделировать только неупругие деформации известной величины с помощью температурной аналогии. Её суть состоит в изменении коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) материала актуатора на

такую величину, чтобы его температурные деформации достигли величины фазово-структурных. Таким образом можно учесть вклад упругой и неупругой части деформации, а величина максимальной фазово-структурной деформации может быть найдена для каждого конкретного сплава по методике, описанной в [2, 3].

Модельная задача, демонстрирующая пример использования актуатора из СПФ в оболочечной конструкции, решается в ANSYS Mechanical APDL с использованием оболочечных (shell281) и балочных (beam189) конечных элементов с квадратичной аппроксимацией узловых неизвестных. Конечно-элементная модель конструкции приведена на Рис. 1, где красными линиями выделены места расположения проволочных актуаторов.

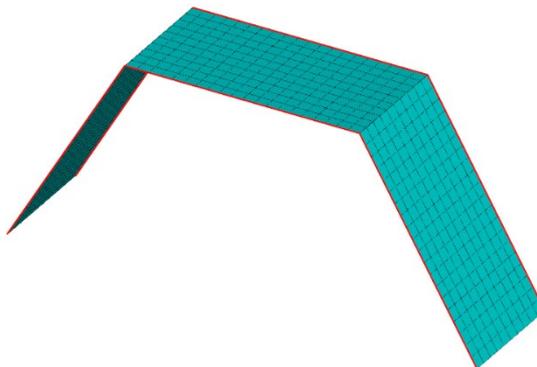


Рис. 1. — Конечно-элементная модель оболочечной конструкции с проволочными актуаторами из СПФ

При моделировании максимальная величина неупругих деформаций проволоки выбрана равной 5%. Учитывается изменение модуля Юнга актуатора при фазово-структурном переходе, поскольку модуль упругости в состоянии аустенита в два раза больше, чем при мартенсите. В численных примерах проанализирована возможность изменения геометрии коробчатой оболочечной конструкции при разных вариантах закрепления её краёв, различном количестве и месторасположении актуаторов.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задачи № 1.3.1 и 1.3.2.

Литература

1. Abramovich H. Intelligent Materials and Structures. Berlin: De Gruyter, 2016. 386 p.
2. Tikhomirova K. Computation of phase and structural deformations in shape memory alloys. One-dimensional model // Materials Today: Proceedings. 2017. Vol. 4. P. 4626–4630. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.04.041>
3. Тихомирова К.А. Феноменологическое моделирование фазовых и структурных деформаций в сплавах с памятью формы. Одномерный случай // Вычислительная механика сплошных сред. 2018. Т. 11, №1. С. 36–50. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2018.11.1.4>

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЬДА

Матвеев В.П., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б.

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

С развитием арктических регионов и регионов с холодным климатом исследование механических свойств льда приобретает критическое значение. Знания в данной области играют ключевую роль в проектировании и реализации ледовых переправ, строительстве и эксплуатации сооружений при механическом воздействии на них ледовых масс в условиях низких температур. Освоение арктической зоны затруднено сложностью доставки строительных материалов, в связи с чем перспективным направлением является использования льда в качестве конструкционного материала [1], что требует всестороннего исследования особенностей механического поведения льда и определения его механических свойств.

Лед представляет собой сложный и разнородный материал, свойства которого варьируются в зависимости от его структуры и химического состава. Имеются значительные различия по физико-химическим характеристикам, таким как плотность и микроструктура для морского и пресноводного льда. Наблюдается существенное разнообразие форм, ориентации и размеров кристаллов в микроструктуре льда, связанное с разными типами его формирования [2]. В зависимости от структуры зерен лед может иметь как изотропные, так и анизотропные механические характеристики [3]. Возраст льда, условия его формирования в разных географических зонах оказывают существенное влияние на его механические свойства. Стоит отметить, что в естественных условиях наблюдается значительный градиент температуры между верхней поверхностью льда и нижней поверхностью, где температура льда близка к точке замерзания воды [4].

Среди механических свойств льда наиболее изученной является изгибная прочность. Для оценки данного прочностного параметра используются методы консольной балки, когда из ледовой массы образец вырезается частично, при этом одна сторона образца остается связанной с ледяным покровом и традиционные испытания на 3х и 4х точечный изгиб полностью извлеченного из ледовой массы образца. Наибольшее влияние на изгибную прочность льда оказывает уровень пористости в обратно пропорциональной зависимости [5]. Менее изучены прочностные характеристики льда при растяжении и сжатии, известные результаты оценки которых также указывают на снижение предела прочности при увеличении пористости и увеличении температуры окружающей среды. Низкие прочностные характеристики льда и хрупкий вид разрушения затрудняют использование данного материала в качестве конструкционного. В последние годы наблюдается интерес к улучшению характеристик льда путем его упрочнения различными типами включений и создания тем самым ледовых композитных материалов [6].

Недостаточно изученным остается механическое поведение льда при длительном воздействии нагрузки. Известно, что лед проявляет вязкоупругие свойства. Полную деформацию льда часто рассматривают как сумму упругих деформаций, замедленных упругих деформаций (delayed elastic strain), которые восстанавливаются не мгновенно после снятия нагрузки, вязких деформаций, характеризующихся невозможностью восстановления ползучестью материала и деформаций от трещинообразования [3]. Такой сложный характер механического поведения льда затрудняет определение упругих характеристик,

так как традиционные статические испытания материала включают в себя эффект от замедленных упругих деформаций. Модуль упругости и коэффициент Пуассона в данном случае принято называть эффективными упругими характеристиками. Для определения мгновенных упругих характеристик используются волновые и ультразвуковые методы. Исследования, посвященные изучению упругих характеристик льда немногочисленны и демонстрируют существенный разброс результатов.

Для углубленного изучения механических свойств и поведения льда в различных условиях требуется использование современных высокочувствительных инструментов, в частности для измерения деформаций. Волоконно-оптические датчики (ВОД), обладающие высокой чувствительностью, долговечностью и надежностью, возможностью работы при низких температурах представляют собой перспективное решение для таких исследований, обеспечивая точное отслеживание деформационных изменений в ледяных структурах. Возможность внедрения ВОД в материал позволяет преодолеть ограничения по организации крепления датчиков ко льду. Использование данных чувствительных элементов может быть востребовано как в лабораторных условиях на образцах относительно малых размеров, так и в естественных условиях формирования больших ледяных массивов.

В настоящей работе представлен обзор современных данных о механических свойствах льда и методах их исследования. Приведены результаты получения образцов из чистого льда со встроенными волоконно-оптическими датчиками. Проведены эксперименты, направленные на оценку эффективности использования таких датчиков для измерения деформационного состояния льда и исследования его механических характеристик.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.3.3.

Литература

1. Бузник В. М., Гончарова Г.Ю., Степанов Р.О., Разомасов Н.Д., Махсидов В.В. Освоение труднодоступных районов арктической зоны: новые технологии упрочнения ледовых покрытий для транспортных узлов и коммуникаций // Холодильная Техника. 2019. Т. 108, № 11. С. 40–45.
2. Cherepanov N. Classification of ice of natural water bodies // Ocean '74 - IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment. Halifax NS, Canadas: IEEE, 1974. P. 97–101.
3. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice // Cold Reg. Sci. Technol. 2010. Vol. 60, № 2. P. 107–129. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.10.003>
4. Johnston M., Timco G. Temperature Changes in First Year Arctic Sea Ice During the Decay Process // Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice Dunedin, New Zealand, 2nd–6th December 2002
5. Timco G.W., O'Brien S. Flexural strength equation for sea ice // Cold Reg. Sci. Technol. 1994. Vol. 22, № 3. P. 285–298.
6. Бузник В. М. Перспективы применения холодостойких арктических материалов в аварийно-спасательном оборудовании, предназначенном для эксплуатации в условиях Арктики // Материалы деловой программы Межведомственного опытно-исследовательского учения сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации, Арктическая зона Российской Федерации, 06–07 апреля 2023 года. Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023.

МИКРОСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ДВОЙНИКОВАНИЯ И РАЗДВОЙНИКОВАНИЯ МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРЫ В ФЕРРОМАГНИТНОМ СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Роговой А.А., Столбова О.С.

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

В данной работе на примере сплава Гейслера Ni_2MnGa обоснован подход к описанию процессов двойникования и раздвойникования мартенситной структуры. Сплавы этого типа относятся к классу функциональных (умных) материалов, которые способны значительно изменять свою форму и размеры под действием внешних магнитных и/или силовых полей (при этом деформации могут достигать 6-10%). То есть с помощью этих полей можно контролировать форму и размер образца, изготовленного из таких материалов [1]. Такое поведение этих сплавов определяется их структурой, которая возникает результате прямого фазового перехода первого рода, реализуемого только за счет изменения температуры (охлаждения) из аустенитного состояния (высокотемпературная фаза) в мартенситное состояние (низкотемпературная фаза). В мартенситном состоянии в сплаве Гейслера формируются двойники, что приводит только к объемной деформации незначительной величины. Поскольку температура мартенситного состояния значительно ниже температуры Кюри, сдвойникованные варианты мартенсита самопроизвольно намагничиваются даже при отсутствии внешнего магнитного поля. В мартенситном состоянии формируются многочисленные магнитные домены с разными направлениями векторов намагниченности, и энергетически выгодно, чтобы эти домены координировались друг с другом таким образом, чтобы суммарная намагниченность материала при отсутствии внешнего магнитного поля была равна нулю. Во внешнем магнитном поле начинается движение стенок магнитных доменов, вращение векторов намагниченности и переориентация (раздвойникование) сдвойникованных вариантов мартенсита.

Координированная двойниковая мартенситная структура описывается уравнением совместности Адамара для деформаций. Решение этого уравнения позволяет определить поверхности, по которым происходит сдвиг, направления и величину скольжения в тетрагональной кристаллической ячейке, соответствующей рассматриваемому материалу в мартенситном состоянии, приводящие к возникновению и исчезновению двойниковой структуры. Показано, что в сплаве с памятью формы одновременно и неразрывно существуют два типа двойников: деформационные и структурные. Первый связан с деформацией простого сдвига, происходящей в соответствии с условием совместности Адамара в мартенситной пластине, что приводит к излому этой прямой пластины и появлению двух повернутых на определенный угол относительно друг друга элементов, образующих этот двойник. Структурный двойник образуется из двух частей, в каждой из которых тетрагональные кристаллические ячейки мартенсита ориентированы одинаково, но короткие оси всех этих тетрагональных ячеек составляют угол 90° , когда эти ячейки находятся в разных частях двойника. Образование деформационного двойника в результате сдвига материала приводит к возникновению соответствующей деформации. Образование структурного двойника инициирует структурную деформацию. Показано,

что определенное положение структурного двойника в деформационном приводит к равенству этих деформаций.

Построенная микромеханическая модель поведения сплава Гейслера описывает структурный переход, связанный с раздвойникованием вариантов мартенсита (мезоэлементов) под действием магнитного поля. Анализируя задачи моментной теории упругости, возникающие в механике деформируемого твердого тела при магнитном воздействии, записан частный случай этой теории, в котором тензор моментных напряжений, инициированных только магнитным полем, равен нулю [2]. Этот результат позволил построить общее выражение для уравнения состояния, которое описывает в рамках малых деформаций поведение анизотропного материала. Тензор напряжений в этом уравнении состоит из симметричной и антисимметричной частей, последняя из которых зависит только от магнитного поля. Для задачи механики деформируемого твердого тела с таким уравнением состояния построено вариационное уравнение Лагранжа. Общее выражение для уравнения состояния конкретизировано для анизотропного материала, имеющего одну ось симметрии четвертого порядка и две оси симметрии второго порядка.

Результаты, полученные с помощью описанной модели, сравнивались с результатами, представленными в экспериментальных работах [3, 4]. Рассматривался процесс переориентации одного варианта мартенсита в другой, происходящий при приложении внешнего магнитного поля. Определены касательные и нормальные усилия на поверхностях скольжения при приложении внешнего магнитного поля в момент переориентации варианта мартенсита. Учитывая процесс переориентации мартенситных вариантов, образующих двойник, построены кривые намагничивания и определены компоненты тензора деформации. Полученные результаты показали хорошее совпадение с имеющимися экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.3.4.

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 // Mech. Adv. Mater. Struct. 2024 (online). <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2355627>
3. Heczko O., Straka L. Temperature dependence and temperature limits of magnetic shape memory effect // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 94 . P. 7139–7143. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1626800>
4. Heczko O. Magnetic shape memory effect and magnetization reversal // J. Magn. Mater. 2005. Vol. 290–291 . P. 787–794. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.397>

СИНТЕЗ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ БЕЗОПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ-НОСИТЕЛЕЙ, ОБЛАДАЮЩИХ НИЗКОЙ (ДО МИНУС 60 °С) ТЕМПЕРАТУРОЙ ЗАМЕРЗАНИЯ

Лебедев А.В., Лысенко С.Н.

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

Классические магнитные жидкости, стабилизированные олеиновой кислотой, имеют температуру отвердевания равную -60°C . Указанная температура определяет минимальную границу рабочих температур классических магнитных жидкостей, обусловленную типом поверхностно активного вещества (олеиновая кислота). Величина этой температуры не зависит от температуры плавления несущей базовой среды [1]. Добиться существенного расширения диапазона рабочих температур можно путем использования иных сурфактантов, с более низкой температурой плавления. Перспективным представляется использование жидкостей, стабилизированных полипропилен гликолем. Благодаря его низкой температуре замерзания магнитная жидкость сохраняет подвижность вплоть до температур -100°C . Правда это возможно не со всякой жидкостью-носителем. Наиболее подходящей средой для частиц, покрытых слоем молекул полипропилен гликоля, являются спирты [2]. Ниже на рис. 1 в качестве примера приведено сравнение температурных зависимостей обратной вязкости классической магнитной жидкости на базе изооктана (T замерзания -110°C) и жидкости, стабилизированной полипропилен гликолем, на базе пропанола-1 (T замерзания -126°C).

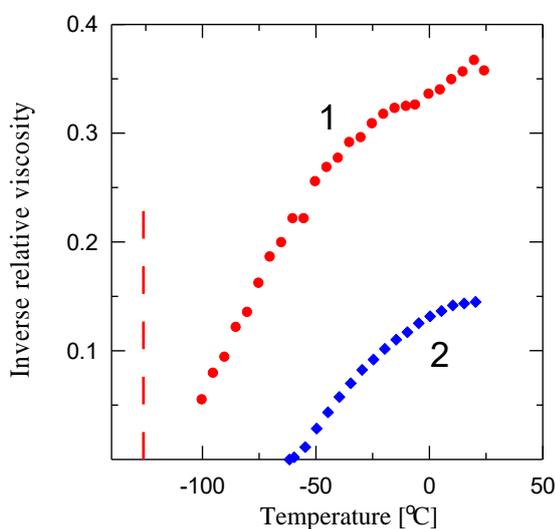


Рис. 1. — Температурная зависимость обратной относительной вязкости для жидкости, стабилизированной ППГ (кривая 1) и жидкости на базе изооктана, стабилизированной олеиновой кислотой (кривая 2).

Были исследованы реологические свойства у серии образцов жидкостей, стабилизированных ППГ молекулярной массой 340 на базе ряда низкотемпературных жидкостей: метанол, этанол, пропанол, метилацетат, аллил хлорид. Наилучшие результаты показала жидкость на базе аллил хлорида. На рис.2 для сравнения приведены результаты измерения вязкости ППГ стабилизированной жидкости на базе хлористого аллила (нижняя кривая), метанола (средняя кривая) и пропанола (верхняя кривая).

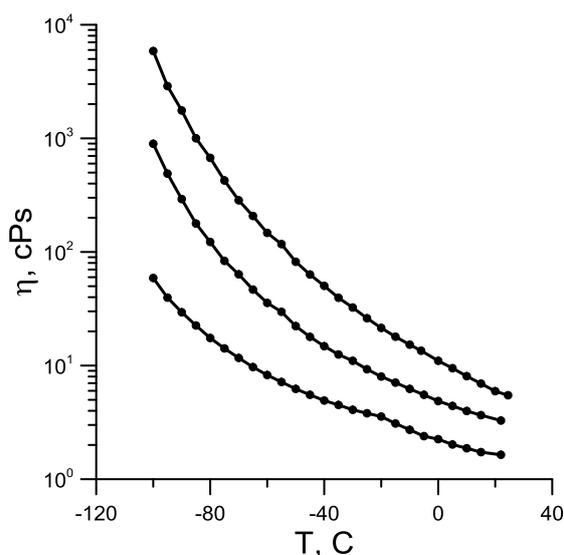


Рис. 2. – Температурная зависимость вязкости жидкости, стабилизированной ППГ340, на базе аллил хлорида (нижняя кривая), метагола (средняя кривая) и на базе пропанола (верхняя кривая).

Объемная концентрация частиц в случае аллил хлорида и метанола равнялась 0.3, для пропанола – 0.2. Как следует из рисунка, наилучшим вариантом базовой жидкости является аллил хлорид. В этом случае при заявленной нижней границе рабочих температур -60°C вязкость жидкости составляет около 10 сПа при намагниченности насыщения ≈ 16 кА/м.

Другим направлением в поисках низкотемпературных магнитных жидкостей было исследование магнитных жидкостей со стабилизацией частиц двойным слоем ПАВ. В этом случае возможен синтез жидкостей на основе спиртово-водных смесей. Технология стабилизации магнитных частиц двойным слоем ПАВ была предложена вскоре после синтеза классических магнитных жидкостей [3, 4]. В наших работах [5], отличие от [3, 4], мы использовали в качестве второго слоя ПАВ готовую соль – додецил сульфат натрия. Стабилизированные таким образом частицы магнетита хорошо диспергировались в антифризе (смеси этиленгликоля и воды). К сожалению, с понижением температуры жидкость теряла устойчивость и коагулировала.

Прорывной идеей оказалось использование в качестве внешнего слоя ПАВ неионогенного стабилизатора ТВИН20. Молекулы ТВИН20 имеют в своем составе гидрофобный хвост (лауриновую кислоту), соединенную посредством активного центра (пятизвенного цикла) с группой гидрофильных олигомеров полиэтилен гликоля. Индекс 20 в наименовании стабилизатора указывает на суммарное число звеньев у ПЭГ олигомеров.

Была синтезирована магнитная жидкость на основе частиц магнетита, стабилизированная двойным слоем ПАВ: первый слой - классическая олеиновая кислота, второй слой – ТВИН20. Полученная жидкость сохраняла устойчивость при отрицательных температурах вплоть до замерзания несущей среды – антифриза. Также были исследованы реологические свойства жидкости со стабилизацией ТВИН20 на базе смеси воды и пропилен гликоля.

На рис. 3(а) представлены температурные зависимости вязкости обоих образцов жидкостей. Из рис. 3(а) следует, что использование в качестве несущей среды смеси воды и этилен гликоля позволяет получить магнитную жидкость с меньшей вязкостью. Однако при использовании этилен гликоля возникают трудности с точным поддержанием концентрации смеси, поскольку низкая температура плавления (около -70°C) реализуется в очень узком диапазоне концентраций. Более перспективным в этом смысле

представляется использование в качестве базовой среды водно-спиртовой смеси. Например, вода – метанол.

Существенным моментом при использовании неионогенного стабилизатора ТВИН20 является то, что он слабо влияет на реологию магнитной жидкости. Вязкость стабилизированной им магнитной жидкости практически пропорциональна вязкости базовой среды. На рис. 3(б) представлены температурные зависимости относительной вязкости синтезированных образцов.

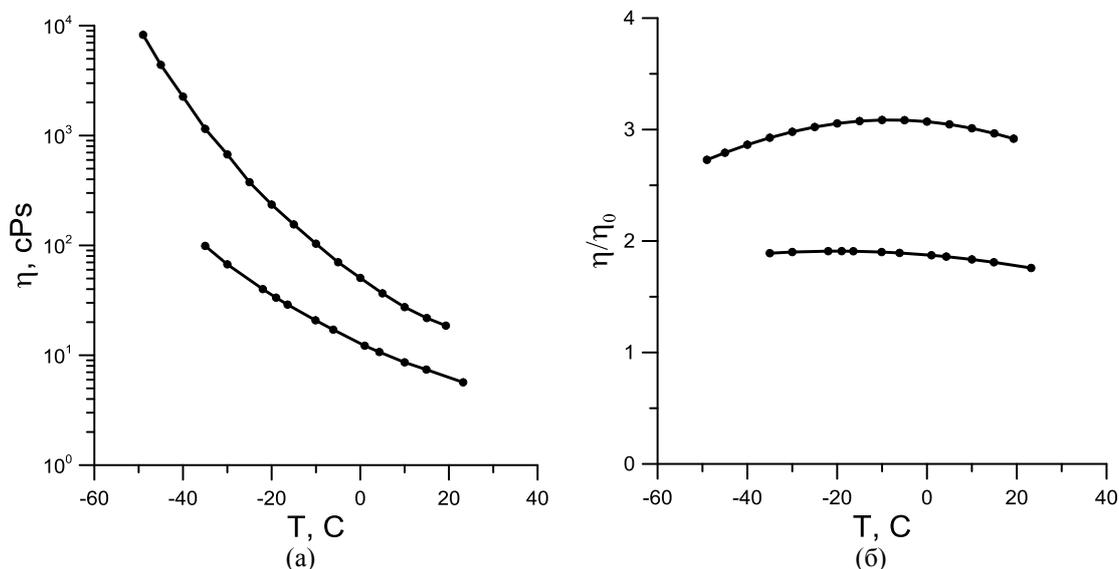


Рис. 3. (а) Температурная зависимость вязкости жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ – олеиновая кислота/ТВИН20, на базе вода-этилен гликоль (нижняя кривая) и на базе вода-пропилен гликоль (верхняя кривая). (б) Температурная зависимость относительной вязкости образцов магнитной жидкости на базе вода – этилен гликоль (нижняя кривая) и вода – пропилен гликоль (верхняя кривая).

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.4.1.

Литература

1. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V. Low-temperature susceptibility of concentrated magnetic fluids // J. Chem. Phys. 2004. V. 121. N. 11. P. 5455.
2. Lebedev A.V., Lysenko S.N. Magnetic fluids stabilized by polypropylene glycol // JMMM. 2011. V. 323. P. 1198.
3. Shimoiizaka J. Method of preparing a water-base magnetic fluid. Pat. 4094804 (USA), 1978.
4. Khalafalla S.E., Reimers G.W., Rholl S.A. Dilution stable water based magnetic fluids. Pat. 4208294 (USA), 1979.
5. Лебедев А.В. Магнитная жидкость, стабилизированная двойным слоем ПАВ в воде, отвергает известные модели реологии и диполь-дипольного взаимодействия // Коллоидный журнал. 2024. Т. 86. № 4. С. 538.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ БИНОДАЛЬНОЙ КРИВОЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО- ИЛИ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ АГРЕГАЦИИ ЧАСТИЦ

Иванов А.С., Сомов С.А.

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

Магнитные жидкости [1] (МЖ) представляют собой самый старый и обширный класс мягких магнитных материалов, известных уникальным сочетанием полезных свойств: текучесть, магнитная управляемость, теплообмен и др. Несмотря на большое разнообразие физических свойств и технологий синтеза, все МЖ демонстрируют общее явление, которому посвящена настоящая работа — агрегация магнитных наночастиц (МНЧ) вследствие индуцированного полем (или температурой) фазового перехода первого рода вида «коллоидный газ - коллоидная жидкость». Это явление было обнаружено в 1970-х [2]. Агрегация МНЧ является вредным процессом для технических приложений, так как она влияет на функциональность устройств [3], однако в биомедицинских приложениях агрегация является естественной и полезной, т.к. МНЧ в тканях собираются в кластеры, а некоторые современные терапевтические методики [4] основаны на этом явлении [5].

Суть явления заключается в том, что изначально однородная МЖ с объемной концентрацией МНЧ ϕ_0 при фиксированной температуре T и некотором пороговом магнитном поле H_{tr} становится термодинамически неустойчивым [6], [7]. При этом небольшая (1-5 %) доля всех МНЧ переходит в конденсированную фазу, дискретно распределённую в исходной МЖ в виде капель микронного размера («капельные агрегаты»). Концентрация МНЧ в них высока $\phi_{II} = 0.3...0.6$, в то время как окружающая («газовая») фаза становится менее концентрированной, чем исходный образец $\phi_{II} < \phi_0$. Термодинамическое состояние МЖ описывается изображающей точкой на фазовой плоскости в координатах (ξ, ϕ) с бинадальной кривой, где безразмерный параметр Ланжевена ξ описывает отношение магнитной энергии МНЧ к её тепловой энергии. Предлагаемая работа посвящена разработке лабораторного метода, позволяющего экспериментально измерить бинадальную кривую – индивидуальную характеристику МЖ на фазовой диаграмме, позволяющую предсказать соотношение фаз и концентрации коллоидных частиц в каждой из них при заданных H и T .

В основе лабораторного метода построения бинадальной кривой МЖ лежит тщательный сбор исходных данных о физических свойствах исследуемого образца. Необходимыми вспомогательными данными являются: информация об исходных материалах, из которых изготовлена жидкость (ПАВ, носитель, материал частиц), плотность, квазистатическая кривая намагничивания, пригодная для магнитогранулометрического анализа. В качестве основных данных является зависимость объёмной доли конденсированной фазы (капельных агрегатов) при (как можно более разнообразном) наборе комбинаций внешних воздействий. Эту информацию предлагается получить с помощью обработки фотографий, полученных на установке, описанной ранее в [8]. Установка представляет собой термостатированную прозрачную ячейку Хеле-Шоу, позволяющую получить тонкий (0.1 мм) слой МЖ при заданной температуре T , и помещать его в рабочую область катушек Гельмгольца, которые намагничивают исследуемый образец однородным магнитным полем. Образец наблюдается в

инструментальный микроскоп посредством фотокамеры, монтированной в головку и подключенную к компьютеру. При возникновении в МЖ капельных агрегатов, они фотографируются. Снимки впоследствии обрабатываются скриптом, написанном на языке Python (см. Рис. 1). Работа программы заключается в цифровой обработке изображения (с целью повышения контрастности и избавления от шумов) и поиске объектов эллипсоидальной формы. Программа распознает эти объекты, сохраняет их размеры и координаты в отдельный файл и вычисляет суммарный объем всех капельных агрегатов. Зная объем области всего кадра, толщину слоя и объем капельных агрегатов, можно вычислить объемную долю, занятую «жидкой» и «газообразной» фазами при T и H . Чем больше этот массив данных – тем полнее будет итоговая экспериментальная зависимость.

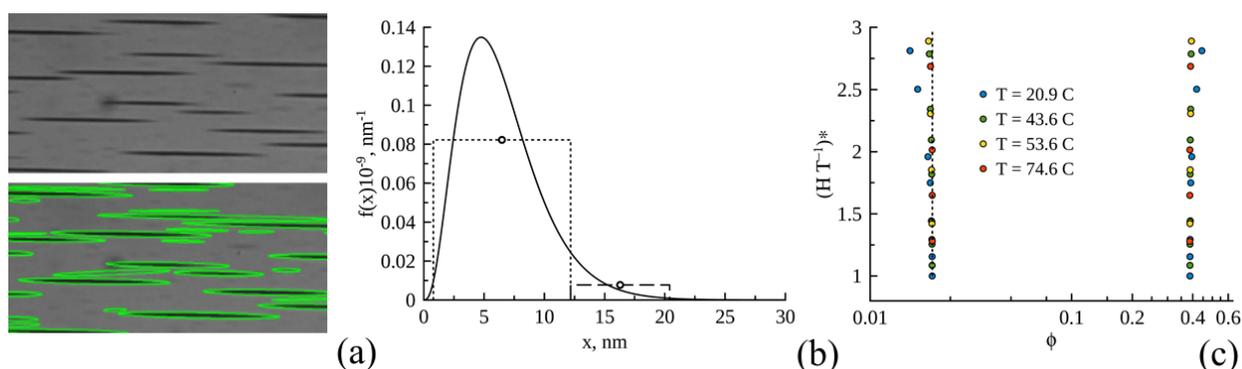


Рис. 1. - Фотография ячейки Хеле-Шоу с МЖ и капельными агрегатами в ней до (сверху) и после обработки (снизу) (a); бифракционная аппроксимация функции распределения частиц по размерам (b); экспериментальная бинадальная кривая в координатах концентрация - нормированный параметр Ланжевена (c)

Однако одних лишь экспериментальных данных недостаточно для построения бинадальной кривой МЖ, поэтому требуется прибегнуть к некоторой теоретической модели, способной восполнить недостающие знания об исследуемом объекте, исходя из разумных предположений и на основе имеющихся данных об индивидуальных особенностях исследуемого образца. На сегодняшний день наиболее современной и совершенной является модель фазового расслоения бифракционной феррожидкости, основанная на термодинамической теории возмущений первого порядка [7]. Согласно подходу [7], непрерывная функция распределения исследуемой жидкости заменяется гистограммой с двумя столбцами, соответствующими «малым» и «крупным» частицам. Молярная концентрация первых составляет примерно 95 %, а их диаметр не превышает 10 нм. Крупные частицы, наоборот, в процентном отношении малочисленны, а их диаметр как правило превышает 16 нм. Далее для полученной бидисперсной модели записывается система из 5 уравнений, 2 из которых являются линейными (описывают сохранения суммарного объема частиц обеих фракций по двум фазам), и 3 трансцендентных нелинейных уравнений, описывающих условие термодинамического равновесия. При наступлении последнего выполняется равенство химического потенциала для «мелких» частиц в газовой и жидкой фазе. Аналогичные условия формулируются по отдельности для «крупных» частиц и молекул жидкости-носителя.

Описанный подход был применен к нескольким образцам МЖ вида «магнетит – олеиновая кислота – керосин». Результаты работы метода продемонстрированы на Рис. 1 b, c для одного из исследованных образцов. В качестве исходных данных была взята непрерывная функция распределения частиц по диаметрам магнитных ядер (Рис. 1 b), которая аппроксимировалась бифракционной гистограммой, согласно которой диаметр «мелких» частиц равнялся приблизительно 6.5 нм, а «крупных» - 16.3 нм. Далее был обработан массив фотоснимков капельных агрегатов, конденсированных в этом

образце при разных значениях H и T в диапазоне от 21 до 75 С. Координаты точек по оси абсцисс были рассчитаны по описанному выше алгоритму, а по оси ординат точки расположены согласно нормированному параметру Ланжевена, удачно сочетающему отношение двух воздействий – магнитного поля и температуры. Как видно из графика, практически все точки на соответствующих ветвях бинадальной кривой располагаются на одной общей кривой. Такую зависимость можно использовать для предсказания термодинамической устойчивости МЖ при любых других параметрах (H , T), в том числе тех, которые не измерялись в эксперименте.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.4.2.

Литература

1. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 356 с.
2. Hayes C.F., Observation of association in a ferromagnetic colloid // J. Coll. Int. Sci. 1975. Vol 52, P. 239–243, [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(75\)90194-0](https://doi.org/10.1016/0021-9797(75)90194-0)
3. Sharyna S.G., Krakov M.S., Effect of a high-gradient magnetic field on particle concentration distribution in a magnetic fluid seal: rivalry of the diffusion and magnetophoresis // J. Magn. Magn. Mater. 2024. Vol. 599. art. no. 172095, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172095>.
4. Creighton F.M., Magnetic-based systems for treating occluded vessels, US Patent No. 8,308,628, 2012.
5. Zubarev A.Y., Musikhin A.Y., Kuzhir P., Raboisson-Michel M., Verger-Dubois G. Magnetically induced circulation flow in thrombosed channels // Math. Methods Appl. Sci. 2024. Vol. 47, pp. 6753–6761, <https://doi.org/10.1002/mma.8862>.
6. Cebers A.O., Thermodynamic stability of magnetofluids // Magnetohydrodynamics. 1982. Vol. 18, pp. 137–142.
7. Ivanov A.O., Novak E.V., Phase separation of ferrocolloids: the role of van der Waals interaction // Coll. J. 2007. Vol. 69. pp. 302-311, <https://doi.org/10.1134/S1061933X07030064>.
8. Ivanov A.S. Anomalous interfacial tension temperature dependence of condensed phase drops in magnetic fluids // Phys. Fluids, 2018. Vol 30. Iss. 5, p. 052001-9. <https://doi.org/10.1063/1.5022524>
9. Chen Y.-M., Pearlstein A.J. Stability of free-convection flows of variable- viscosity fluids in vertical and inclined slots // J. Fluid Mech. 1989. Vol. 198. P. 513-541. <https://doi.org/10.1017/S0022112089000236>

ВИБРОЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДЕМПФЕРА НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРА С ПОРОШКОВЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ МАГНИТОМЯГКОГО МАТЕРИАЛА

Сомов С.А., Косков М.А., Иванов А.С., Степанов Г.В.

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

*Государственный научно-исследовательский институт химии и технологий
элементоорганических соединений*

Введение.

Повсеместное использование электронного оборудования обуславливает необходимость исследований, направленных на разработку и усовершенствование средств защиты электронных устройств от ударных и вибрационных воздействий [1]. В настоящее время для этой цели используются различные по конструкции демпфирующие системы. Широкое применение нашли демпферы, рабочее тело которых изготовлено из высокоэластичных материалов [2, 3]. Часто используется силиконовая резина, например, в изделии [4]. Активно обсуждается целесообразность изготовления демпфирующих систем с применением ферроэластов – магнитных силиконовых композитов [5–7]. Ферроэласт представляет собой упругую силиконовую матрицу с порошковым наполнителем из ферромагнитного материала, равномерно распределённого по всему объёму тела. Частицы наполнителя имеют микронные и субмикронные размеры. Интерес к демпферам на основе ферроэластов обусловлен возможностью управления упругими свойствами и формой рабочего тела демпфера при помощи внешнего магнитного поля [8]. Обе возможности используются при создании как пассивных, так и активных систем виброзащиты [9]. Данная работа посвящена исследованию пассивного демпфера новой конструкции (автор – Г. В. Степанов, ГНИИХТЭОС, г. Москва).

Конструкция.

Демпфер, представленный на рисунке 1, состоит из нескольких ключевых компонентов, обеспечивающих его работу. Основной элемент конструкции — опытный образец (2), который представляет собой два цилиндра с центральным отверстием. Эти цилиндры расположены между тремя дисковыми неодимовыми магнитами (3), которые установлены одноименными полюсами друг к другу. Такое расположение магнитов создает пондеромоторные силы, воздействующие на магнитный эластомер, находящийся внутри цилиндров. Эластомер, в свою очередь, выступает как основной демпфирующий элемент конструкции, реагируя на внешние колебания и вибрации.

Для фиксации элементов конструкции используется шток (4), на котором они закрепляются с помощью резьбовых шайб. Шток также служит основой для крепления грузов, что позволяет имитировать реальные условия эксплуатации демпфера при

вибрационных воздействиях. В альтернативной версии демпфера система с неодимовыми магнитами заменяется на алюминиевые диски, которые имеют аналогичные геометрические параметры, что и у магнитов. Все элементы конструкции размещены в пластиковом корпусе (1), который был изготовлен с использованием 3D-принтера Tevo Tornado из материала PETG.

Для крепления демпфера на металлическом столике используются десять 5-мм винтов, которые обеспечивают надёжное закрепление конструкции. Сам столик прикрепляется к вибростенду с помощью одного 8-мм винта, который проходит через гравер и предотвращает смещения и повороты столика во время проведения вибрационных испытаний.

Проведение испытаний.

Первые испытания были проведены с использованием магнитной системы демпфера. Вся конструкция демпфера была установлена на вибростенд, обладающий возможностью генерировать вибрации с усилием до 1000 Н и в диапазоне частот от 2 Гц до 5 кГц. Этот вибростенд позволял воспроизводить различные режимы вибрационных нагрузок, имитируя реальные условия эксплуатации демпфера.

Для измерения вибрационных характеристик на конструкцию использовались пьезоэлектрические датчики. Один датчик прикреплялся к металлической плите, на которой фиксировалась конструкция демпфера, а второй датчик — к грузу, закреплённому на штоке. Для надёжной фиксации датчиков использовался цианакриловый клей, который обеспечивал прочное крепление.

Испытания проводились согласно требованиям ПАО «ПНППК» для демпферов оптических гироскопов в частотном диапазоне от 10 Гц до 2 кГц. В диапазоне от 10 Гц до 100 Гц нагрузка линейно увеличивалась от 4g до 6g, а в диапазоне от 100 Гц до 2 кГц оставалась постоянной и составляла 6g, где $g \approx 9.8 \text{ м/с}^2$ — модуль ускорения свободного падения вблизи поверхности Земли. Вся настройка испытаний, сбор и обработка данных осуществлялись с использованием специализированного программного обеспечения VisProbe от компании Виском.

После испытаний с магнитной системой аналогичное испытание было проведено для немагнитной системы демпфера. Тестирование проводилось по тому же сценарию, что и для магнитной системы, что позволило получить сопоставимые данные и провести анализ эффективности различных конфигураций демпфера. Сравнение результатов испытаний магнитной и немагнитной систем помогло выявить влияние магнитного поля на демпфирующие свойства устройства.

Результаты испытаний.

Результаты испытаний были представлены в виде коэффициента передачи (рис. 2). Коэффициент передачи представляет собой отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала, что позволяет оценить эффективность демпфера на различных частотах. На графике можно наблюдать заметное влияние постоянного магнитного поля на КП демпфера. Под действием магнитного поля изменяются как

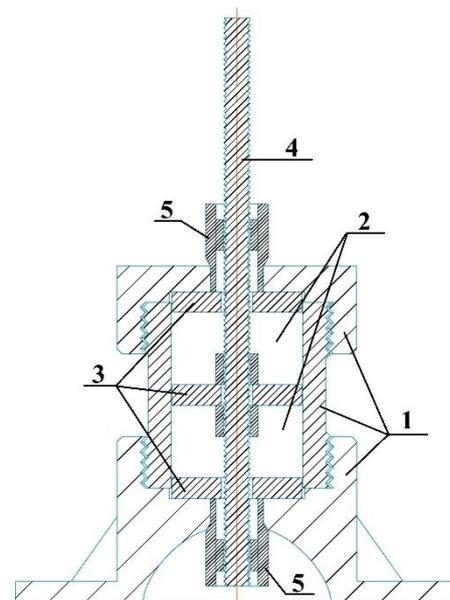


Рис. 1 Конструкция демпфера: 1 – пластиковый корпус, 2 – опытный образец (эластомер), 3 – неодимовые магниты, 4 – направляющий стержень, 5 - гайки

положение основного резонансного максимума, так и величина коэффициента передачи на резонансной частоте ($\omega_{рез}$).

В условиях отсутствия магнитов резонансная частота демпфера составляла $\omega_{рез} = 45$ Гц, при этом коэффициент передачи на этой частоте был равен 2.1. Однако введение постоянного магнитного поля приводит к смещению резонансной частоты до 75 Гц, одновременно снижая коэффициент передачи на резонансной частоте до 1.6.

Однако при частотах, превышающих резонансную ($\omega > \omega_{рез}$), эффективность демпфера с магнитами начинает снижаться по сравнению с немагнитной системой. На высоких частотах различия между системами становятся менее заметными, что указывает на минимальное влияние магнитного поля на характеристики демпфера в этом диапазоне.

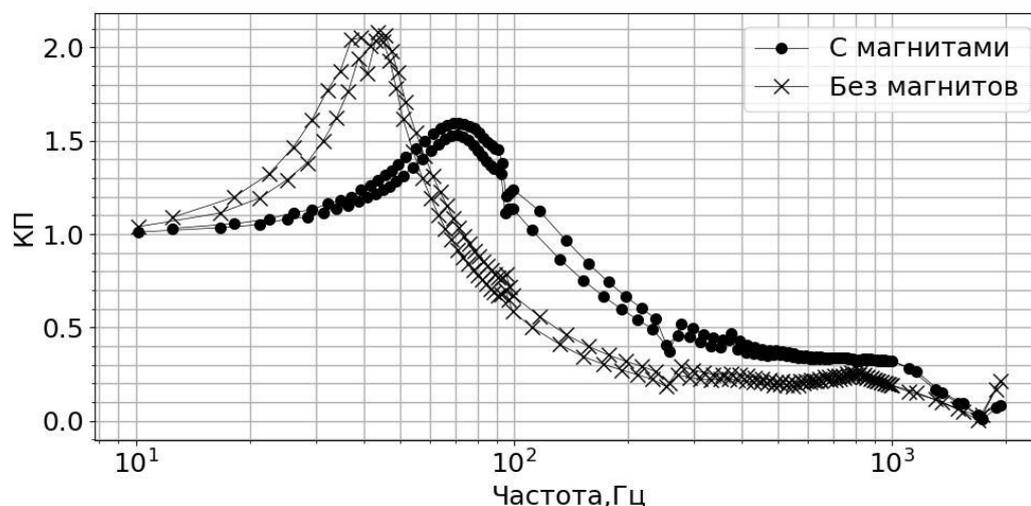


Рис. 2 Коэффициент передачи вертикального виброускорения в зависимости от частоты при нагрузке в 200 г

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.4.3.

Литература

1. ГОСТ 24346-80 // М.: Стандартинформ, 2010. 28 с.
2. Мартин Дж. М., Смит У. К. Производство и применение резинотехнических изделий. // СПб.: Профессия, 2006. 480 с.
3. Сергаева М. Ю., Цисс В. Г. Обоснование работоспособности виброзащиты систем авиационного оборудования // Омский научный вестник. Механика, машиностроение, 2005. Т. 30. № 1.
4. Damper E1E931S & E1E4045 Datasheet. Hutchinson Stop-Choc GmbH & Co.KG. Renningen, 2014.
5. Горбунов А. И., Михайлов В. П., Степанов Г. В., Борин Д. Ю., Андриянов А. А., Темнов Д. В., Семеренко Д. А. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение», 2008. Вып. 70. № 1. - с. 90–107.
6. Михайлов В. П., Зобов И. К., Селиваненко А. С. Демпфер на основе магнитореологического эластомера для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования // Инженерный журнал: наука и инновации: электронное научно-техническое издание, 2013. Вып. 18. № 6, 50.
7. Васько В. М., Гребенюк С. Н., Решевская Е. С. Определение напряженно-деформированного состояния эластомерного виброизолятора // Вісник Запорізького національного університету, 2015. № 3. с. 36–41.
8. Райхер Ю. Л., Столбов О. В. Деформация эллипсоидального образца феррогеля в однородном магнитном поле // Прикладная механика и техническая физика, 2005. Т. 46. № 3. - с. 153 – 164.
9. Руководство по проектированию виброизоляции машин и оборудования. // М.: Стройиздат, 1972. 160 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТОВ, СВЯЗУЮЩИМ КОТОРЫХ ЯВЛЯЕТСЯ БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНЫЙ КАУЧУК С НАПОЛНИТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА И ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ

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

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

Обнаружение того факта, что добавление сажи в каучук значительно меняет механические свойства материала дало толчок к изучению эластомерных композитов. С середины XX века до настоящего времени было проведено множество исследований по использованию различных наполнителей. Тем не менее, существующие модели не учитывают всех особенностей поведения материала и, как следствие, приводят к неточностям при проектировании реальных изделий [1]. Зачастую, даже известные эффекты (Маллинза, Пэйна) игнорируются при построении определяющих соотношений и проведении численных экспериментов. В связи с этим, необходимо менять подход к проведению экспериментов и учитывать различные эффекты, характерные для этого класса материалов.

В работе рассматривается механическое поведение эластомерных нанокompозитов в экспериментах с вложенными циклами и циклических испытаниях с нарастающей амплитудой деформаций. В экспериментах с вложенными циклами образцы подвергались циклическим нагрузкам с разными (но постоянными в ходе одного цикла) скоростями деформирования. Кроме того, первый цикл нагружения задается с максимальной скоростью и до максимальной кратности удлинения, а последующие нагружения идут с меньшей скоростью и меньшими амплитудами деформаций. Важным элементом при деформировании образцов в обоих экспериментальных подходах стали продолжительные остановки при смене направления движения захватов. Это сделано для того, чтобы в образце завершились основные временные процессы, и система вернулась к состоянию равновесия.

Проведение таких испытаний позволяет выявить три важные особенности поведения эластомерных нанокompозитов [2]. Во-первых, в экспериментах с вложенными циклами наблюдается отличие характерного времени вязкоупругих процессов при растяжении от характерного времени при снятии нагрузки. Вторая и третья особенности получены из результатов циклических испытаний с нарастающей амплитудой (Рис. 1) деформирования. Размягчение материала (эффект Маллинза) нужно учитывать как в равновесной, так и в диссипативной составляющих тензора напряжений Коши. И, в-третьих, кривые деформирования для размягченного материала (при повторных циклах нагружения) почти не отличаются друг от друга при разных скоростях нагружения в области трехкратного и четырехкратного удлинения. Хотя при меньших (умеренных) уровнях деформации (в рамках того же эксперимента) механические свойства отличаются значительно. Таким образом, в области очень больших деформаций механическое поведение материала нельзя рассматривать как поведение вязкоупругой среды.

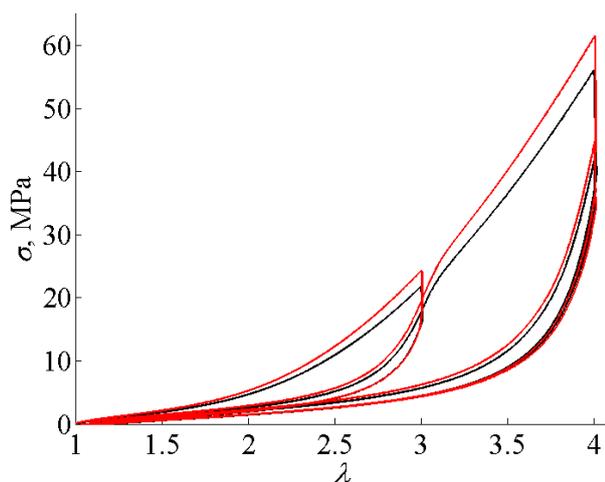


Рис. 1. – Результаты испытаний бутадиен-стирольного каучука, наполненного техническим углеродом (50 массовых частей). Черным цветом - скорость деформирования 10%/мин, красным- 100%/мин

Испытания (одноосное растяжение с нарастающей амплитудой при приложении циклической нагрузки по гармоническому закону) на динамо-механическом анализаторе (Рис. 2) показали, что упругие свойства наполненных эластомеров зависят от амплитуды деформации (эффект Пэйна). Для некоторых видов наполнителя эффект более ярко выраженный, чем для других.

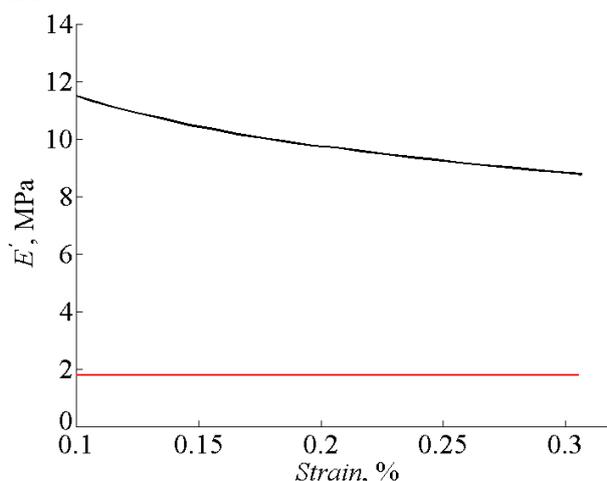


Рис. 2. – Результаты испытаний методом динамо-механического анализа для чистого каучука (красным) и наполненного 50 м.ч. технического углерода (черным)

Предложенные методики проведения экспериментов позволяют получать обширную информацию о вязкоупругих свойствах материалов. Эти данные можно использовать при разработке новых материалов с необходимым набором свойств.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.5.1.

Литература

1. Sokolov A.K., Svistkov A.L., Shadrin V.V., Terpugov V.N. Influence of the Mullins effect on the stress-strain state of design at the example of calculation of deformation field in tyre // International journal of non-linear mechanics. – 2018. – V. 104. – P. 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2018.05.003>
2. Mokhireva K. A., Svistkov A. L., Shadrin V. V. Investigation of the strain rate and stretch level dependent behavior of elastomeric nanocomposites in complex uniaxial tests under finite strains // Mechanics of Materials. – 2024. – V.199. – P.105177. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2024.105177>

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

Мохирева К.А., Свистков А.Л.

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

В рамках выполненной работы были исследованы эластомерные наноккомпозиты на основе бутадиен-стирольного каучука а) без наполнителя и наполненные б) 50 массовыми частями (м.ч.) технического углерода (ТУ), в) 43 м.ч. ТУ и 7 м.ч. многослойных нанотрубок и г) 43 м.ч. ТУ и 7 м.ч. графена. Рассмотрение особенностей механического поведения материалов и последующий сравнительный анализ проводились согласно результатам экспериментов с вложенными циклами и циклических испытаний с нарастающей амплитудой деформаций.

На рисунке 1 представлены результаты эксперимента с вложенными циклами в виде зависимости истинного напряжения σ (компонента тензора напряжений Коши) от кратности удлинения материала λ вдоль оси растяжения. Действующие в вязкоупругом материале напряжения всегда можно представить в виде суммы равновесной σ_{eq} и диссипативной σ_{dis} составляющих

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

Согласно полученным результатам (рис. 1) можно видеть сильное размягчение в материале на первом цикле нагружения. Происходит это в результате перестроек полимерных клубков, частичных разрывов перенапряженных цепей и перестроек включений друг относительно друга. На каждом участке смены движения захватов задаются продолжительные выдержки по времени, чтобы система вернулась к состоянию равновесия. По «равновесным» точкам можно построить кривую, характеризующую упругое поведение материала. Вид данной кривой задается упругим потенциалом (рис. 1).

При растяжении образца деформационные кривые пойдут выше «равновесной» кривой. При снятии нагрузки, после продолжительной выдержки в растянутом состоянии, кривые пойдут ниже «равновесной» кривой. Сравнить вязкоупругие свойства в размягченном материале при разных скоростях деформирования можно в области близь вертикальной пунктирной линии, обозначенной на рисунке 2. Эта линия соответствует значению кратности удлинения $\lambda=1.5$. В окрестности этого значения реализуется «установившийся» режим потерь, при котором диссипативная часть тензора напряжений почти не меняет своего значения при деформировании материала в условиях движения захватов с постоянной скоростью. При этом значении кратности удлинения $\lambda=1.5$ далее определяется зависимость диссипативной составляющей напряжения от скорости деформирования материала.

Как при растяжении, так и при снятии нагрузки, чем выше скорость деформирования материала, тем дальше отстоят рассматриваемые кривые нагружения от кривой равновесного состояния, тем больше диссипативные потери. При этом величина диссипации независимо от скорости деформирования размягченного материала также существенно зависит от его рецептуры. При одновременном добавлении в каучуковую матрицу технического углерода и многослойных нанотрубок, в отличие от материала, наполненного только техническим углеродом в той же массовой пропорции, увеличивается жесткость материала и ярче проявляются вязкоупругие свойства.

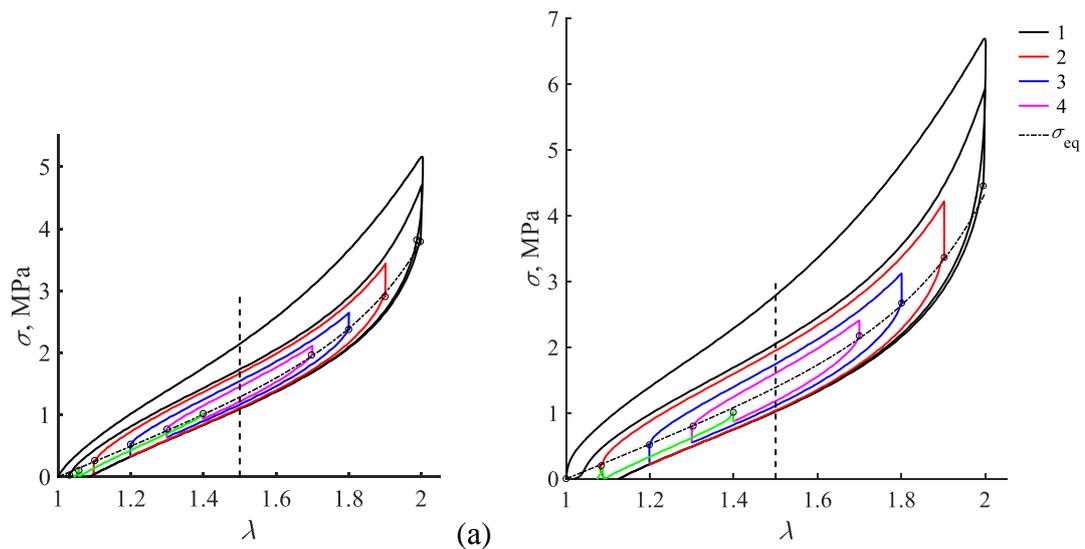


Рис. 1. - Зависимость значений истинного напряжения σ от кратности удлинения λ в эксперименте с вложенными циклами для материала на основе бутадиен-стирольного каучука, наполненного 50 м.ч. технического углерода (а); 43 м.ч. ТУ и 7 м.ч многослойных нанотрубок (б). Абсолютная величина скорости изменения кратности удлинения образца $|d\lambda/dt|$ соответственно равна: 4 мин⁻¹ (1); 4 мин⁻¹ (2); 1 мин⁻¹ (3); 0.25 мин⁻¹ (4). Штрих-пунктирная линия (σ_{eq}) — «равновесная» кривая. Вертикальная пунктирная линия обозначает середину области с «установившимся» режимом потерь

Отдельно стоит отметить разницу в диссипативной части тензора напряжений в «установившемся» режиме на этапах нагрузки и разгрузки при разных скоростях деформирования (рис.1) размягченного материала. То есть имеется отличие в характерном времени релаксации при нагружении и при разгрузке в экспериментах, когда скорость движения захватов будет одинаковой и при нагружке, и при разгрузке. В момент начала движения захватов мы полагаем, что материал находится в равновесном состоянии. Даже при малых скоростях деформирования для некоторых материалов отмечается асимметрия в поведении. И чем больше скорость деформирования, тем больше возрастает разница в диссипации материала на этапе нагрузки и разгрузки. Стоит добавить, что при снятии нагрузки в области больших деформаций не видно существенных отличий в кривых разгрузки, а в области малых — они словно ложатся одна на другую (рис.1). Это интересная особенность напоминает эффект вынужденной эластичности [1, 2], когда внешние силы могут растянуть образец. Но сам образец самостоятельно при данной температуре не стремится вернуться в исходное состояние после снятия нагрузки. Нужно подогреть образец, чтобы он вернулся в исходное состояние. Что-то подобное мы наблюдаем в рассматриваемом эксперименте. То есть под действием только собственных возможностей образец ведет себя иначе, чем во время нагружения внешними силами.

Помимо экспериментов с вложенными циклами, нами были проведены эксперименты с нарастающими амплитудами деформаций. Скорость нагружения в течение всего эксперимента составляла $|\dot{\lambda}| = 0.10 \text{ мин}^{-1}$.

Согласно рисунку 2, можно построить «равновесную» кривую (штрихпунктирная линия 3), которая характеризует упругое поведение неразмягченного материала и проходит через «равновесные» точки, полученные на каждом цикле нагружения в момент окончания выдержки по времени. Вязкоупругое поведение при первом деформировании неразмягченного материала описывает сплошная линия 1. И пунктирная линия 2 определяет вязкоупругое поведение уже размягченного материала. Таким образом, в

материале диссипативную составляющую тензора напряжений можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$\sigma_{\text{dis}} = \sigma_{\text{dis},1} + \sigma_{\text{dis},2} \quad (2)$$

Второе слагаемое в разложении (2) обозначает диссипативное напряжение, которое имеет место в размягченном материале $\sigma_{\text{dis},2}$, и первое слагаемое – дополнительное напряжение $\sigma_{\text{dis},1}$, которое существует в неразмягченном нанокомпозите. Значение $\sigma_{\text{dis},1}$ определяется разностью значений между кривыми 1 и 2 на рисунке 2 при заданной кратности удлинения λ . Аналогично, значение $\sigma_{\text{dis},2}$ определяется разностью значений между кривыми 2 и 3.

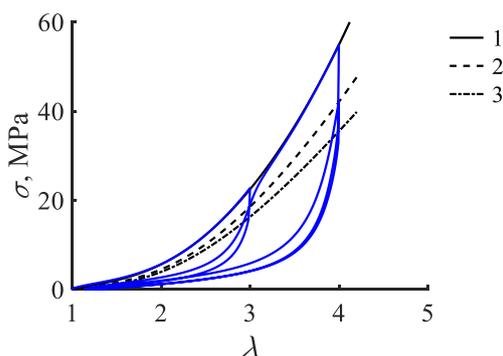


Рис. 2. - Зависимость значений истинных напряжения σ от кратности удлинения λ в эксперименте с нарастающими амплитудами деформаций для материала на основе бутадиен-стирольного каучука, содержащего 43 м.ч. технического углерода и 7 м.ч. многостенных нанотрубок. Разница между значениями напряжений, определяемыми кривыми (1), (2) и (3) при выбранном значении кратности удлинения, дает представление о двух компонентах диссипативных напряжений. Подробности в тексте

Во время первого растяжения материала дополнительное напряжение $\sigma_{\text{dis},1}$ быстро растет с увеличением кратности удлинения. При остановках захватов оно падает до нулевого значения и больше не вносит вклад в поведение размягченного материала. Значение $\sigma_{\text{dis},2}$ тоже растет с увеличением кратности удлинения при постоянной скорости деформирования, но в меньшей степени.

В работе исследовано вязкоупругое поведение высоконаполненных эластомерных материалов (разные матрицы и разные виды наполнителей). Благодаря проведению экспериментов с вложенными циклами, можно отдельно определять вклад равновесной и неравновесной (диссипативной) компонент тензора напряжений Коши в поведение среды. А также можно оценивать асимметрию поведения материала на этапах нагрузки и разгрузки при разных скоростях нагружения. Благодаря циклическим экспериментам с нарастающей амплитудой деформации показано, что диссипативные процессы на первом цикле нагружения материала проявляются существенно, чем на последующих циклах, и это проявление растет с увеличением кратности удлинения материала.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.5.2.

Литература

1. Lazurkin J. S Cold-drawing of glass-like and crystalline polymers // J. Polym. Sci.. 1958. Vol. 30, Is.121. P. 595-604. <https://doi.org/10.1002/pol.1958.1203012150>
2. Leonov A. A theory of necking in semi-crystalline polymers // Int. J. Solids Struct. 2002. Vol. 39. P. 5913-5926. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00478-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00478-X)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ НОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ. СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ О МИКРОСТРУКТУРЕ РАЗЛИЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ И ФОРМИРОВАНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ

Изюмов Р.И., Морозов И.А., Свистков А.Л.

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

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет получать трехмерные данные о рельефе поверхности образца и регистрировать силовые взаимодействия зонда с материалом на нанометровом масштабе (рис. 1). Интерпретация полученных результатов базируется на математических и конечно-элементных моделях взаимодействия зонда АСМ с образцом. Эффективным инструментом обработки данных являются нейросети, применение которых замещает времязатратные эксперименты и расчёты. Для их корректного функционирования требуется провести процедуру обучения, основанную на данных с большим объёмом выборки, поэтому очевидно, что конечная нейросеть и безошибочность её работы существенно зависит от использованных данных.



Рис. 1. Рельеф (а) и карта жёсткости (б). 10x10 мкм. Ненаполненный бутадиен-стирольный каучук

Для проведения максимально достоверной интерпретации экспериментальных данных было проведено теоретическое обоснование необходимости точного учёта явлений, связанных с появлением криволинейной границы контакта зонда с материалом. Разработана новая математическая модель, принимающая во внимание исчезновение и появление новых поверхностей контакта и соответствующее изменение энергии поверхностного натяжения (рис. 2).

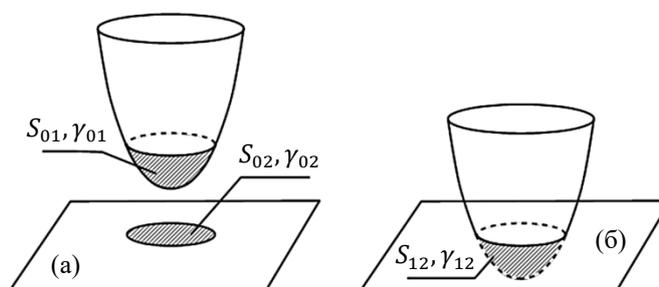


Рис. 2. Система зонд-образец до и после внедрения. В состоянии до контакта (а) отмечены цветом те участки зонда (01) и образца (02), которые при внедрении (б), образуют общую поверхность контакта (12)

Геометрию зонда можно аппроксимировать формой параболоида. Было установлено, что изменение поверхностной энергии в результате внедрения индентора-параболоида описывается формулой (1):

$$U_s = -2\pi\gamma_{01}Rh - \frac{2\pi(\gamma_{02} - \gamma_{12})}{3R} \left((2hR + R^2)^{\frac{3}{2}} - R^3 \right) \quad (1)$$

где γ_{01} , γ_{02} , γ_{12} – значения плотности поверхностной энергии на поверхности 01, 02 и 12., R – радиус кривизны в вершине зонда, h – глубина внедрения.

Полная энергия системы является суммой следующих энергий:

$$U = U_{el} + U_s + U_c, \quad (2)$$

где U_s – изменение поверхностной энергии, U_{el} – упругая энергия деформирования образца, U_c – энергия, накопленная кантилевером.

Для получения конечных выражений, позволяющих описать процесс внедрения зонда в материал, был использован математический приём, предлагающий рассматривать вместо искомого состояния системы (любой момент процесса внедрения, рис. 3) некоторое эквивалентное, являющееся результатом нескольких последовательных вспомогательных действий над системой (рис. 4). Это позволяет решить проблему некорректного определения изменения поверхностной энергии при прямом вычислении.

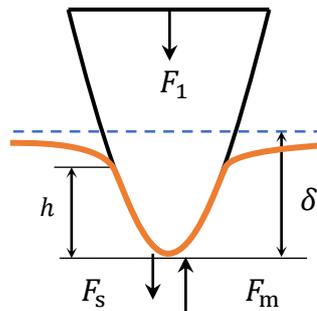


Рис. 3. Внедрение зонда в образец силой F_1 на глубину δ в присутствии поверхностных сил F_s с образованием контакта высотой h и реакцией материала образца F_m

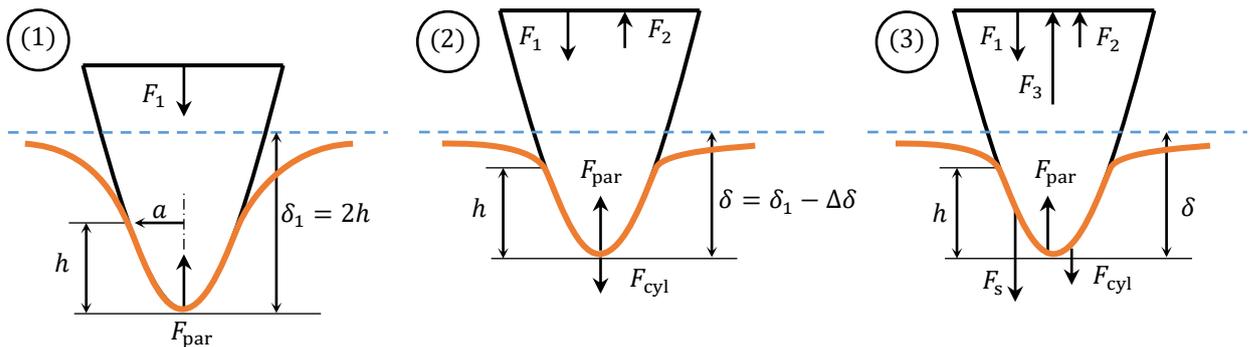


Рис. 4. Поэтапное приложение сил к системе зонд-образец для получения состояния (3), эквивалентного представленному на рис. 3. F_1 – внешняя сила, F_{par} – реакция образца на F_1 по Снеддону (выполняется соотношение $\delta_1 = 2h$), F_2 – корректирующая сила, F_{cyl} – реакция образца на F_2 по Буссинеску (не выполняется соотношение $\delta = 2h$), F_s – поверхностная сила, F_3 – компенсирует действие силы F_s на зонд

Для верификации разработанной модели были проведены эксперименты по сканированию на АСМ образцов ненаполненного и наполненного различными добавками бутадиен-стирольного каучука в режиме наноиндентации и получены массивы данных о его микроструктуре. Полученная выборка будет использована для обучения нейросети на следующем этапе работы.

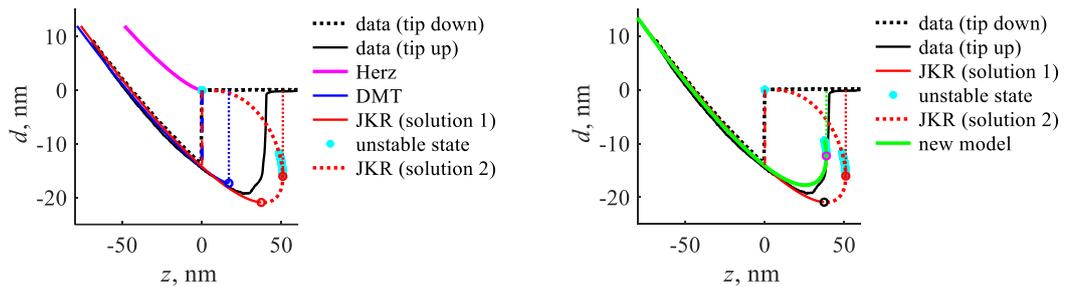


Рис. 5. Описание экспериментальных данных. В новой модели использовано решение задачи с малыми деформациями, но с точным учетом изменения поверхностной энергии. Сравнение с моделью DMT и JKR

Модель описала процесс индентирования и сопровождающие его эффекты с высокой точностью (рис. 5). Анализ потери устойчивости взаимодействия зонда с образцом определил скачкообразное втягивание (рис 5. unstable state) зонда в образец под действием поверхностных сил, прилипание зонда при его извлечении из образца и момент отрыва зонда от образца.

Сравнение новой модели с результатами стандартных моделей DMT и JKR (рис. 5) показало большую гибкость разработанной модели, её способность более точно описывать экспериментальные данные.

Алгоритм определения кривой индентирования распространяется на задачи, в которых на поверхности образца присутствует слой другого материала, и для задач с включениями недалеко от поверхности образца (рис. 6). Было установлено, что предложенный алгоритм реализуется в программных пакетах конечно-элементного анализа.



Рис. 6. Расширение круга проблем, которые можно решать с использованием предложенного алгоритма

Этот алгоритм будет использован на следующем этапе выполнения работ для набора массива данных, необходимых для обучения нейронных сетей. Перед ними будет поставлена задача обучиться определять микроструктуру подповерхностного слоя нанокompозита на базе большого числа решенных численным методом задач индентирования в образцы с различными параметрами материала и наполнения. Конечным результатом должна стать программа, определяющая микроструктуру $Z, R(x, y)$ на основе эксперимента на АСМ (рис. 7).

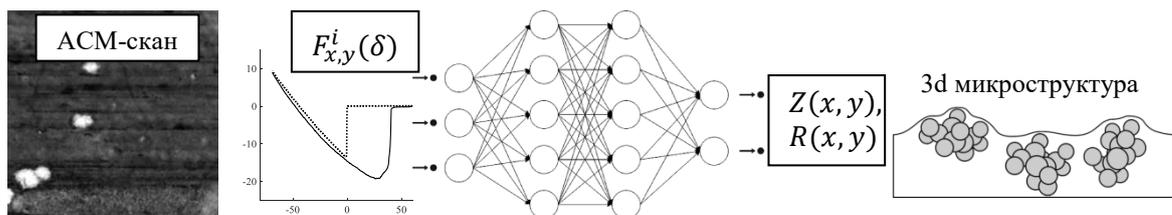


Рис. 7. Схема работы нейросети

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 1.5.3.

Направления исследований и номера задач из плана-графика работ

Механика новых материалов и конструкций

- 1.2.2.** Многопараметрическое численное исследование деформирования и повреждения высоконагруженных пробионических конструкций направленное на получение максимальной положительной синергетики на микроуровне от взаимодействия волокон и связующего за счет выбора оптимальных значений параметров связующего и волокон для зон с различным уровнем нагружения.
- 1.2.3.** Многопараметрическое численное исследование деформирования и повреждения высоконагруженных пробионических конструкций направленное на получение максимальной положительной синергетики на мезоуровне при взаимодействии слоев за счет использования волокон в конструкциях специальных кольцевых стяжек для повышения устойчивости осесимметричных стержневых композитных / металло-композитных элементов и ребер.
- 1.2.4.** Многопараметрическое численное исследование деформирования и повреждения высоконагруженных пробионических конструкций направленное на получение максимальной положительной синергетики на локальном уровне за счет использования бионических принципов сочленения элементов жесткого скелета и мягких пленочных слоев.
- 1.2.5.** Многопараметрическое численное исследование деформирования и повреждения высоконагруженных пробионических конструкций направленное на получение максимальной положительной синергетики на глобальном уровне за счет создания специальных стыков для металло-композитных деталей / отсеков между собой.
- 1.2.6.** Разработка концепции формирования высоконагруженных интеллектуальных пробионических конструкций, включающей структуру конструкций на 4-х уровнях детализации, способы сочленения элементов на всех уровнях детализации и способы ее изготовления.
- 1.3.1.** Разработка новых моделей и алгоритмов расчета напряженно-деформированного состояния smart-систем на основе пьезоэлементов и материалов с памятью формы при статических и динамических нагрузках.
- 1.3.2.** Проведение серии численных и лабораторных экспериментов с целью идентификации и верификации разработанных моделей и алгоритмов.
- 1.3.3.** Разработка методики определения механических характеристик льда на основе измерения деформаций волоконно-оптическими датчиками, базирующей на результатах лабораторных экспериментальных исследований.
- 1.3.4.** Построение соотношений частного случая моментной теории упругости. Касательные усилия на поверхностях скольжения возникают от действия магнитного поля.
- 1.4.1.** Синтез магнитных жидкостей на основе безопасных жидкостей-носителей, обладающих низкой (до минус 60 °С) температурой замерзания.
- 1.4.2.** Экспериментальный контроль физических свойств низкотемпературных феррожидкостей на предмет температурно-индуцированного агрегирования магнитных наночастиц.

- 1.4.3. Теоретический анализ пленочного течения магнитной жидкости.
- 1.5.1. Экспериментальное определение механических свойств нанокомпозитов, связующим которых является бутадиен-стирольный каучук с наполнителями различного состава и объемной доли.
- 1.5.2. Сравнительный анализ полученных данных о механических свойствах нанокомпозитов с целью установления связи между рецептурой эластомерных влияния вибраций и их механическими свойствами.
- 1.5.3. Разработка методики использования нейросетей для обработки экспериментальных данных атомно-силовой микроскопии новых нанокомпозитов. Создание базы данных о микроструктуре различных нанокомпозитов и формирование обучающей выборки.

Оценка прочности и ресурса машин, конструкций и сооружений

- 1.6.1. Разработка методики дизайна остаточных напряжений в титановом сплаве ВТ6 с инструментальным измерением длительности и амплитуда импульса ударного воздействия фотонным доплеровским измерителем скорости.
- 1.6.2. Разработка программы экспериментов по исследованию коррозионной и температурной стойкости остаточных напряжений, созданных методом лазерной ударной проковки.
- 1.6.3. Анализ эффекта наводороживания поверхностного слоя материала при лазерной ударной проковки на усталостные свойства титана.
- 1.6.4. Теоретическое описание закономерностей оксидной/сульфидной/водородной высокотемпературной коррозии высоконагруженных деталей авиационных двигателей в условиях эксплуатации, основанное на связанных уравнениях взаимной диффузии компонент металлического сплава в повреждаемом вязкоупругом теле.
- 1.6.5. Разработка модели контактного взаимодействия неоднородных МДО-покрытий, которая позволит установить связь между механическими характеристиками на микро- и макроуровнях на основе данных экспериментов по индентированию. Моделирование процесса выдавливания мягкой фазы в зону трения.
- 1.6.6. Исследование влияния остаточных напряжений на накопление контактно-усталостных повреждений (КУП) в однородном материале в условиях трения качения.
- 1.6.7. Постановка и построение решения пространственной контактной задачи о предварительном смещении текстурированной поверхности с параметрически заданной формой выступов (впадин) и их взаимным расположением по поверхности упругого (вязкоупругого) основания в условиях частичного проскальзывания под действием заданных внешних сил.
- 1.7.1. Построение математических моделей деформирования и разрушения горнотехнических конструкций различного типа.
- 1.7.2. Проведение комплексных квазистатических и реологических лабораторных испытаний образцов горных пород различных месторождений калийных солей.
- 1.7.3. Проведение многовариантных численных экспериментов по эволюции напряженно-деформированного состояния горнотехнических конструкций

различного назначения и крупномасштабных объектов.

- 1.8.1. Разработка моделей деформирования и разрушения материалов, учитывающих закономерности критичности развития поврежденности в сплавах, керамических и композиционных материалах авиационного моторостроения и ракетной техники.
- 1.8.2. Проведение экспериментов по исследованию закономерностей стадийности развития поврежденности материалов авиационного моторостроения, ракетно-космической техники при квазистатических, усталостных, динамических, ударно-волновых условиях нагружения с использованием средств регистрации высокого пространственно-временного разрешения.
- 1.8.3. Идентификация и верификация разработанных моделей широкодиапазонного поведения материалов, определение параметров моделей применительно к условиям эксплуатации материалов и конструкций авиационного моторостроения, авиакосмического назначения, атомной энергетики.

Турбулентность, магнитная гидродинамика, теплоперенос в многофазных и многокомпонентных средах

- 1.9.1. Разработка математической модели изотермических процессов, возникающих при реализации закрученных течений проводящей жидкости.
- 1.9.2. Проведение комплексных экспериментальных исследований закрученных потоков проводящих жидкостей для определения характеристик протекающих процессов и зависимости интенсивности закрутки потока от параметров силового воздействия.
- 1.9.3. Верификация разработанной модели по данным проведенных экспериментальных исследований.
- 1.9.4. Разработка конфигурации бесконтактного электромагнитного перемешивателя для расплавленных металлов и сплавов на основе проведенных численных и лабораторных экспериментов.
- 1.9.5. Разработка конфигурации жидкометаллического накопителя электроэнергии больших объемов, в которых с помощью закрученных потоков достигается гомогенизация состава жидкого анода и катода.
- 1.10.1. Построение математической модели кинетики абсорбции и массопередачи газовой примеси воздуха к сорбирующей поверхности.
- 1.10.2. Реализация численного алгоритма для разработанной математической модели сорбции газа.
- 1.10.3. Верификация математической модели неизотермического турбулентного течения газозооной смеси по данным серии измерений параметров воздушного потока в конкретных выработках.
- 1.10.4. Проведение многопараметрического моделирования вентиляции добычной панели с вентиляторами-эжекторами, построение аппроксимирующих параметрических зависимостей.
- 1.10.5. Формулировка на основе анализа полученных численных решений оптимальных условий проветривания по критерию времени, формулировка принципов проветривания добычной панели вентиляторами-эжекторами.

- 1.11.1 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 антиклинальную геологическую складку.
- 1.11.2 Исследование влияния вибраций на возникновение движения вязкопластической жидкости в замкнутой области.
- 1.11.3 Исследование транспорта примеси в горизонтальном слое пористой среды с эффектом слабой закупорки, иммобилизации частиц примеси и обобщенного соотношения между проницаемостью и пористостью.
- 1.11.4 Экспериментальные исследования влияния вибраций на устойчивость капли, осаждающейся в пористой среде с заданной плотностью трещин.
- 1.11.5 Исследование формирования внутренних волн на границах раздела стратифицированных водных масс в поверхностных водных объектах.
- 1.11.6 Развитие математической теории нефиковского транспорта пассивных частиц в стационарных вихревых потоках.
- 1.11.7 Интенсификация массообмена в микрожидкостных реакторах за счет концентрационного эффекта Марангони.
- 1.11.8 Турбулентный теплообмен при наличии сложного рельефа.

Научное издание

Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях

**Отчетная конференция по итогам 1 этапа выполнения проекта
5 – 6 ноября 2024 г. Пермь**

Программа и тезисы докладов

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

Подписано в печать 28.10.2024
Формат 60x84 1/16. Усл. п. л. 9,3. Тираж 120 экз.
Заказ 213/2024

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

614013. 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