



УФИМСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

**приоритет2030<sup>^</sup>**

лидерами становятся

# СБОРНИК ТЕЗИСОВ

IV Международной летней школы-конференции  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА:  
МОДЕЛИ И ПРИЛОЖЕНИЯ

29 июня–4 июля 2025 года, г. Уфа



**Skoltech**

Skolkovo Institute of Science and Technology

**РН-БашНИПИнефть**

научно-исследовательский и проектный институт



Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уфимский университет науки и технологий»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА:  
МОДЕЛИ И ПРИЛОЖЕНИЯ**

**Сборник тезисов  
IV Международной летней школы-конференции  
(г. Уфа, 29 июня–4 июля 2025 года)**

Научное электронное издание сетевого доступа

Уфа  
Уфимский университет  
2025

УДК 532+541.12  
ББК 22.253.3+24.53  
Ф50

*Публикуется по решению кафедры прикладной физики ФТИ УУНиТ.  
Протокол № 1 от 02.09.2025 г.*

***Редакционная коллегия:***

канд. физ.-мат. наук, доцент **В.Н. Киреев** (*отв. редактор*);  
д-р техн. наук, профессор **Л.А. Ковалева**;  
д-р физ.-мат. наук, профессор **И.Ф. Шарафуллин**;  
канд. физ.-мат. наук, доцент **А.А. Мусин**;  
ассистент **А.З. Булатова**

**Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения:**  
Ф50 сборник тезисов IV Международной летней школы-конференции  
(г. Уфа, 29 июня – 4 июля 2025 г. / отв. ред. В.Н. Киреев [Электронный  
ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: РИЦ УУНиТ,  
2025. – 119 с. – URL: <https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2025/359.pdf> – Загл. с титула экрана.  
ISBN 978-5-7477-6289-3

В настоящий сборник включены тезисы докладов участников IV Международной летней школы-конференции «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения» (29 июня–4 июля 2025 г.).

Сборник включает в себя тезисы по различным направлениям физико-химической гидродинамики.

УДК 532+541.12  
ББК 22.253.3+24.53

ISBN 978-5-7477-6289-3

© Уфимский университет, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕАКТИВНО ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В ИНДУКТИВНОСВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЕ В СРЕДЕ $\text{CF}_4/\text{Ar}$ Андрянов Н.Г., Гарифуллин И.Ш., Солнышкина О.А., Батыршин Э.С. ....	13
ВЛИЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В НАСЫПНЫХ СРЕДАХ ИЗ ПЕСКА И СТЕКЛЯННЫХ ШАРИКОВ Ахметов А.Т., Гималтдинов И.К., Гизатуллин Р.Ф., Мухаметзянов А.Ф. ....	14
ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В СИСТЕМЕ СКВАЖИНА – ТРЕЩИНА ПKN, ЗАПОЛНЕННАЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТЬЮ Байков В.А., Жонин А.В., Ильясов А.М. ....	15
ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ФЛЮИДА В СИСТЕМЕ «ТРЕЩИНА С НЕЗАКРЕПЛЕННЫМИ БОРТАМИ- ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ» ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАЗРЫВЕ ПЛАСТА Байков В.А., Насырова Д.А., Шайхуллин А.Р. ....	16
ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В КОНЕЧНОЙ ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА Башмаков Р.А., Шамматова А.А., Пангаева А.О. ....	17
ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В МИКРОКАНАЛАХ С МАССИВОМ СТОЛБИКОВ Биккинина Н.Б., Солнышкина О.А., Булатова А.З. ....	18
ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ СТРУКТУР МИКРОТЕПЛООБМЕННИКОВ НА ПРОЦЕССЫ МАССОПЕРЕНОСА Булатова А.З., Солнышкина О.А., Биккинина Н.Б. ....	19
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ, ПРОХОДЯЩЕМ ЧЕРЕЗ ГАЗОГИДРАТНЫЙ МАССИВ, ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ Валеев Д.Ф., Чиглинцева А.С., Русинов А.А. ....	20

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ ВОРОНОГО В ПК «РН-ВЕГА»	
Валеева Ю.Р., Бикбулатова Г.Р., Сарапулова В.В. ....	22
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ НЕФТЕШЛАМОВЫХ ЭМУЛЬСИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ	
Валиуллина В.И., Галеев Р.Р., Зиннатуллин Р.Р. ....	23
РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЁРДЫХ ВЕЩЕСТВ ПО ДАННЫМ ТЕМПА СВОБОДНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ	
Васильев М.К., Усманов Б.А. ....	24
ОЦЕНКА ХАРАКТЕРА НАСЫЩЕННОСТИ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ СО СЛОЖНЫМ ТИПОМ ПОРИСТОСТИ	
Вахитова Г.Р., Сахаутдинова Э.Р., Прая Э.Д. ....	25
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ В СКВАЖИНАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ЗАКАНЧИВАНИЯ	
Волкова К.Е., Евлампиев Я.В. ....	27
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ НА СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ КАПЛИ	
Галеева Д.Р., Киреев В.Н. ....	28
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СБОРКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ	
Галеев Р.Р., Зиннатуллин Р.Р., Валиуллина В.И. ....	29
К ТЕОРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТВОЛА СКВАЖИНЫ АКУСТИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ	
Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р. ....	30
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ПДМС-ЧИПАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ	
Галиева К.А., Солнышкина О.А., Батыршин Э.С. ....	31

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ТЕЧЕНИИ КУЭТТА-ТЕЙЛОРА	
Гизатуллина Э.И., Киреев В.Н.....	33
ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АНОДНОГО СКЛЕИВАНИЯ: РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРИЛОЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ	
Гимадеев А.В., Гарифуллин И.Ш., Солнышкина О.А., Батыршин Э.С....	34
ФОРМИРОВАНИЕ ЛИНЗОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ЗАДААННЫМИ СВОЙСТВАМИ	
Гордеева А.И., Корнилин Д.А., Нурмухаметов Д.И., Пономарёв Р.С. ....	35
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРАТА МЕТАНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	
Давлетшина М.Р.....	36
МОДЕЛИ МАССОПЕРЕНОСА ПАРОВ КРЕМНИЯ ОТ РАСПЛАВА К ИЗДЕЛИЮ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО ВАКУУМА	
Демин В.А., Демина Т.В., Игошев С.А. ....	37
АПРОБАЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО РАСХОДОМЕРА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	
В МЕХАНИЗИРОВАННЫХ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИНАХ НА ЦИФРОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ «АНК «БАШНЕФТЬ»	
Еникеев Р.М., Палагута А.А., Акрамов И.Р., Давлетбаев А.Я.....	39
РАСЧЕТ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ В АППАРАТАХ ВИХРЕВОГО ТИПА	
Еникеев И.Х.....	40
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В АРТЕРИИ	
Ермакова М.В., Киреев В.Н. ....	42
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В СКВАЖИНЕ С ТРЕЩИНОЙ КОНЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ	
Ефимова М.В., Давлетбаев А.Я. ....	43
ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ДОБЫЧИ НА ОСНОВЕ «МАЛОЗАТРАТНЫХ» ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН	
Ефимова М.В., Ишкин Д.З., Давлетбаев А.Я. ....	44

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЭФИРОВ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ В НЕФТЕВОДОНАСЫЩЕННОМ ПЛАСТЕ Жонин А.В. ....	46
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВОДОНЕФТЯНЫЕ ЭМУЛЬСИИ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ Зиннатуллин Р.Р., Валиуллина В.И., Галеев Р.Р. ....	47
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА В ПК «РН-КИМ» Зиннурова А.Т., Давлетбаев А.Я., Минибаев М.Р., Муллағалиев Б.И. ....	48
АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПРОДУКТИВНОСТИ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ ФАЗОВЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ Иванаевская Е.С., Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф. ....	49
БИЛИНЕЙНОЕ ТЕЧЕНИЕ В СИСТЕМЕ «БЕСКОНЕЧНЫЙ ПЛАСТ- КОНЕЧНАЯ ТРЕЩИНА АВТО-ГРП» Ильясов А.М., Киреев В.Н. ....	50
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПО ПРОМЫСЛОВЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДАННЫМ В ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИНАХ В «РН-ВЕГА» Ишмуратов Т.А., Ганиев Э.Э., Ибатулин А.А. ....	52
ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА В БЛОКЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ РАНКА-ХИЛША Ишмурзина Н.М., Михайленко К.И. ....	53
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ Каншаев Д.А., Киреев В.Н. ....	54
АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ГРАНИЦАХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ И ГИДРАТОНАСЫЩЕННЫХ ПЕСЧАНИКОВ, ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ Каримова Г.Р., Галиакбарова Э.В. ....	56

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВЫТЕСНЕНИЯ ВЯЗКИХ НЕФТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ ТИПОВ СШИТЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ Кравченко М.Н., Ларченко В.П., Чехов А.П. ....	57
РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ФЛЮИДОВ НА ОСНОВЕ ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПЕНГА-РОБИНСОНА Курбанова С.С. ....	58
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА В СИСТЕМЕ СТЕРЖНЕЙ В ВИДЕ ГРАФА ТИПА «ДЕРЕВО» Мартынова Ю.В. ....	59
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПЛОСКИХ ЛАМИНАРНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ СТРУЙ Маукаев И.И., Киреев В.Н. ....	60
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА ГАЗОВОЗДУШНЫХ СКОПЛЕНИЙ ИЗ ТРУБОПРОВОДОВ Махмудова И.Ф., Ташбулатов Р.Р. ....	61
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «FRAC VISION» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОУДАРА В СКВАЖИНАХ С ТРЕЩИНАМИ ГИДРОРАЗРЫВА Махота А.А., Башмаков Р.А., Кашапов Д.В. ....	62
ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО ОТВОДА В МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕДНЫХ ПЛАСТИН С МИКРОКАНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ Мечников В.А., Батыршин К.Э., Солнышкина.О.А. ....	63
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ С ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА КОНЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ Мирзаянова Э.М., Ильясов А.М., Давлетбаев А.Я., Сарапулова В.В. ....	64
РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАТУХАНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА Муллагалямов Р.Х., Усманов Б.А. ....	65



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЧКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В НАСЫЩЕННЫЙ ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ С НЕОДНОРОДНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ Мусакаев Н.Г., Бельских Д.С. ....	66
КВАЗИМОНОДИСПЕРСНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАССЛОЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ЭМУЛЬСИОННОЙ СИСТЕМЫ Мусин А.А., Юлмухаметова Р.Р. ....	67
ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЛАСТА НА ПРИТОК ГАЗА К СКВАЖИНАМ С ТРЕЩИНАМИ ГИДРОРАЗРЫВА Мухаметова З.С., Ковалева Л.А. ....	68
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ НЕФТИ Мухарямов И.Г., Ковалева Л.А. ....	69
ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЕЙ Мухарямова Г.И., Ковалева Л.А. ....	70
КОЛЕБАНИЯ РАСХОДА АНОМАЛЬНО ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ПЕРЕПАДЕ ДАВЛЕНИЯ Мухутдинова А.А. ....	71
ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ «ФРОНТ ПРОТАИВАНИЯ МЕРЗЛОГО ГРУНТА ПОД ДВУХСЛОЙНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ» Назмутдинов Ф.Ф. ....	73
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ Назмутдинова Л.Р. <sup>1</sup> , Назмутдинов Ф.Ф. <sup>2</sup> .....	74

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА РАССЕЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ НА МНОЖЕСТВЕ СФЕР Насибуллаева Э.Ш. ....	75
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ С УЧЕТОМ ТЕПЛООБМЕНА Низамова А.Д. ....	76
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ Низамова А.Д. ....	77
ВЛОЖЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ ПОДМОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫБРАННОГО ПОДГРАФА ПОДАЛГЕБР, ДОПУСКАЕМЫХ УРАВНЕНИЯМИ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ Никонорова Р.Ф. ....	78
ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРУБКАХ ТОКА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ Поташев К.А., Баушин В.В., Салимьянова Д.Р., Ураимов А.А. ....	79
ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ Рамазанов А.Ш., Исламов Д.Ф., Давлетшин Ф.Ф., Акчурин Р.З. ....	80
ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЭРИТРОЦИТОВ ЦЕЛЬНОЙ И РАЗБАВЛЕННОЙ КРОВИ В МИКРОКАНАЛАХ СО СТЕНОЗОМ Рахимов А.А., Валиев А.А., Ахметов А.Т. ....	81
PVT-МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СОАВЕ-РЕДЛИХА-КВОНГА С ПОПРАВКОЙ ПЕНЕЛЁ Ремизов А.Л., Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф. ....	82
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ PVT-ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАСТОВЫХ ФЛЮИДОВ Ремизов А.Л., Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф. ....	83
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ Сабиров Т.З., Зиннатуллин Р.Р. ....	84

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ДВУМЕРНЫХ ТРУБКАХ ТОКА Салимьянова Д.Р., Поташев К.А., Малбаева А.И. ....	85
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ Самигуллина А.И., Шарафуллин И.Ф. ....	86
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛАХ С НЕРОВНЫМИ СТЕНКАМИ Сафина И.Ф., Солнышкина О.А. ....	87
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ С УЧЕТОМ СЕДИМЕНТАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ Сахибгареев Э.Э., Мусин А.А., Ковалева Л.А. ....	88
ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ В НЕФТЕМАТЕРИНСКОЙ ПОРОДЕ В УСЛОВИЯХ ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ Смирнов А.В., Попов Е.Ю., Мухина Е.Д., Спасенных М.Ю. ....	89
АНАЛИЗ ЦИКЛИЧНОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ НЕФТЯНЫХ СЛАНЦЕВ: СВЯЗЬ С КЛИМАТОМ, ОРБИТАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЗЕМЛИ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ПОРОД Спасенных М.Ю., Карамов Т.И., Козлова Е.В., Попов Ю.А., Севастьянова С.А., Тягузов Д.М., Торшина Л.С. ....	97
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛАХ С НЕРОВНЫМИ СТЕНКАМИ Сулейманова К.И., Солнышкина О.А. ....	100
АПРОБАЦИЯ ПОДХОДА ПО ПОДБОРУ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИН АВТОГРП В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПМ «REXLAB» И ПК «РН-КИМ» Тимершаехова А.Я., Давлетбаев А.Я., Муллағалиев Б.И., Штинов В.А., Минибаев М.Р., Тимершаехов Д.Ф. ....	101

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФИЛЬТРАЦИЮ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ Тулубаева Р.Р., Хасанова Я.Р., Валиуллина В.И., Галеев Р.Р., Мусин А.А. ....	102
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК НА ГИДРОДИНАМИКУ ПОТОКА ЖИДКОСТИ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ПО ТРУБОПРОВОДАМ Уликанов Р.Р. ....	103
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ К НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОЙ СКВАЖИНЕ Уразов Р.Р., Ахметова О.В., Давлетбаев А.Я. ....	105
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЗОННОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАЦИОНАРНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ Ураимов А.А., Поташев К.А. ....	107
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ АНОМАЛЬНО ТЕРМОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ Урманчиев С.Ф. ....	108
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО НАГРЕВА Усманов Б.А. ....	110
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОДА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАССЛОЕНИЯ СУСПЕНЗИИ Фаррахетдинова А.И., Сахибгареев Э.Э., Мусин А.А. ....	111
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ КОЭФФИЦИЕНТНОЙ ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ Хайруллин М.Х., Бадертдинова Е.Р., Абдуллин А.И. ....	113
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ НЕФТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ Хасанова Я.Р., Тулубаева Р.Р., Валиуллина В.И., Галеев Р.Р., Мусин А.А. ....	114

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЧ ЭМП Хисматуллина Ф.С. ....	115
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКТИВНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ЭКОЛОГИИ НЕДР Шарафутдинов Р.Ф., Рамазанов А.Ш., Валиуллин Р.А. ....	116
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СУСПЕНЗИЙ В НАКЛОННЫХ И ПЕРЕКРЁСТНЫХ КАНАЛАХ Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А. ....	117

УДК 621.382,66.088

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕАКТИВНО ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В ИНДУКТИВНОСВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЕ В СРЕДЕ $\text{CF}_4/\text{Ar}$

Андриянов Н.Г., Гарифуллин И.Ш., Солнышкина О.А.,  
Батыршин Э.С.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
Nikitaufa99@gmail.com

Травление кремния является ключевым процессом в микроэлектронной промышленности, который играет важную роль в производстве полупроводниковых устройств, интегральных схем, а также для создания микроканалов в микрофлюидных чипах. В данной работе рассмотрен процесс реактивно ионного травления кремния в установке с индуктивно связанной плазмой, а также влияние мощности основного источника плазмы, согласующего генератора, соотношение газов  $\text{CF}_4/\text{Ar}$  на скорость травления и профиль каналов.

Выбраны кремневые подложки с кристаллографической решеткой (100). Перед этапом нанесения защитных слоев подложки очищались в ультразвуковой ванне в несколько этапов: промывка в растворе пирани и ополаскивались в воде. Для формирования микроканалов использовалась стандартная процедура фотолитографии и рассматривалось несколько комбинаций защитных масок. В качестве защитного слоя рассматривались: 1) негативный фоторезист ФН-16-У7; 2)  $\text{Cr}$ /фоторезист; 3) фоторезист/ $\text{Cr}/\text{Cu}$ . Установка для плазмохимического травления оснащена двумя ВЧ-генераторами. Реализованы следующие режимы травления: общее время для всех образцов составляло 20 минут, мощность основного источника варьировалась 300-500 Вт, мощность источника смещения 100-250 Вт, соотношение газов  $\text{CF}_4/\text{Ar} = 3:1$  и  $1:1$ . Для изучения скорости травления и профиля каналов полученные образцы сканировались на электронном микроскопе. Полученные изображения обрабатывались в ImageJ.

Результаты показали, что оптимальные параметры травления достигаются при мощности основного источника 400 Вт, мощности смещения 100 Вт и соотношении газов  $\text{CF}_4/\text{Ar} = 1:1$ . В этих условиях скорость травления составила 0,46 мкм/мин, а угол профиля каналов —  $87,7^\circ$ . Полученные данные демонстрируют возможность контроля морфологии поверхности и могут быть использованы для оптимизации процессов изготовления микрофлюидных чипов стекло/кремний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ 24-19-00697, <https://rscf.ru/project/24-19-00697/>).

УДК 532.546:534.1

## ВЛИЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В НАСЫПНЫХ СРЕДАХ ИЗ ПЕСКА И СТЕКЛЯННЫХ ШАРИКОВ

Ахметов А.Т.<sup>1,2</sup>, Гималтдинов И.К.<sup>1</sup>, Гизатуллин Р.Ф.<sup>1,2</sup>,  
Мухаметзянов А.Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

<sup>2</sup>Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия  
alfir@anrb.ru

Цель работы — исследование распространения ударных волн малой амплитуды в насыпных пористых средах (песок, стеклянные шарики) при различных водонасыщенностях (0-80%).

Эксперименты проводились в вертикальной ударной трубе, оснащенной секцией насыпных сред (СНС) [1]. Ударно волновой импульс (УВИ) в насыпной среде регистрировался пьезоэлектрическими датчиками типа LH-610 системой L-CARD. Сформированный УВИ многократно переотражается от поверхности песка и верхнего торца ударной трубы. Эпюры давления в насыпной среде «основного» УВИ и переотраженного «зондирующего» импульса (ЗИ) существенно различаются, что обусловлено структурными изменениями в среде при воздействии УВИ [1].

В сухих средах на ЗИ наблюдается «одномоментный» пик давления по всей глубине, амплитуда которого до 2 раз выше основного УВИ. При влажности 10-20% (песок) и 20-40% (шарики) пик на ЗИ исчезает. При 20% влажности в песке возникает пик, обусловленный пузырьками воздуха, в среде из шариков — при 40%. Скорости ЗИ вдвое ниже скорости основных УВИ при влажности 0-60%, при 80% — скорости выравниваются.

Водонасыщенность критически влияет на динамику ударных волн. Песок демонстрирует сильное поглощение при средних значениях влажности (20-60%), тогда как стеклянные шарики обеспечивают более стабильную проводимость.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-11-00274, <https://rscf.ru/project/24-11-00274/>.

### Литература

1. Гизатуллин Р. Ф., Мухаметзянов А. Ф. Скорость и эволюция ударных волн в песке при увеличении водосодержания // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 4. С. 173-180.

# ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В СИСТЕМЕ СКВАЖИНА – ТРЕЩИНА ПKN, ЗАПОЛНЕННАЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Байков В.А.<sup>1</sup>, Жонин А.В.<sup>2</sup>, Ильясов А.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

<sup>2</sup>ООО «АЛТИМ», Уфа, Россия

baikov@bnipti.rosneft.ru

В работе исследуется явление гидроудара в системе скважины и трещины ПKN (приближение Перкинса – Керна – Нордгрена) [1, 2, 3]. Рассматриваются аналитические и численные решения задачи для случая идеальной жидкости (отсутствие вязкости). Целью работы является исследование собственных частот системы.

Для обеих частей системы в линейном приближении в возмущениях справедлива акустическая система уравнений:

$$p_t + \rho_0 c_0^2 v_x = 0, \quad v_t + \rho_0^{-1} p_x = 0 \quad (1)$$

где  $p_t, v_t, p_x, v_x$  – производные по времени и координате для давления и скорости соответственно;  $\rho_0$  – плотность жидкости,  $c_0$  – скорость распространения возмущений давления. Граничные условия на устье скважины и на кончике трещины соответствуют непроницаемой границе. Условие сопряжения скважины и трещины – равенство давлений и потоков на перфорации.

Получено выражение для нормированной частоты колебаний:

$$\sin(\Omega) - R \sin(\tau\Omega) = 0 \quad (2)$$

где  $\Omega = \left(\frac{H}{c} + \frac{l}{c_f}\right)\omega$  – нормированная частота;  $R = \frac{c_f s - c s_f}{c_f s + c s_f}$  – коэффициент отражения при падении волны из скважины в трещину;  $\tau = \frac{cl - c_f H}{cl + c_f H}$  – безразмерный параметр;  $H, l$  – длины,  $c, c_f$  – скорости «звука»,  $s, s_f$  – площади сечения для скважины и трещины.

Итоговым результатом являются соотношения для собственных частот в зависимости от различных вариантов геометрических размеров скважины и трещины, упругих свойств породы.

## Литература

1. Ильясов А.М., Булгакова Г.Т. Квазиодномерная модель гиперболического типа гидроразрыва пласта // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.-мат. н. – 2016. – Т. 20. – № 4. – С. 739-754.
2. Байков В.А. К оценке геометрических параметров трещины гидроразрыва пласта / В.А. Байков, Г.Т. Булгакова, А.М. Ильясов, Д.В. Кашапов // МЖГ. – 2018. – № 5. – С. 64-75.
3. Байков В.А., Жонин А.В., Ильясов А.М. Гидравлический удар при гидроразрыве пласта в согласованной модели трещины и скважины // НХ. – 2023. – № 9.



# ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ФЛЮИДА В СИСТЕМЕ «ТРЕЩИНА С НЕЗАКРЕПЛЕННЫМИ БОРТАМИ- ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ» ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАЗРЫВЕ ПЛАСТА

Байков В.А.<sup>1,3</sup>, Насырова Д.А.<sup>2,3</sup>, Шайхуллин А.Р.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

<sup>2</sup>Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия

<sup>3</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Baikov@bnipti.rosneft.ru

Гидроразрыв пласта (ГРП) – один из важнейших методов интенсификации добычи углеводородов за счёт образования высокопроницаемых трещин в пласте. Известны две основополагающие теоретические модели распространения трещин гидроразрыва. KGD – модель описывает вертикальное поперечное сечение трещины, имеющее форму прямоугольника. В то время как PKN-модель предполагает вертикальное сечение трещины в виде эллипса.

Рассмотрим задачу. Дана одиночная магистральная трещина (рис.1) высотой  $H$ , шириной  $w$ , длиной  $L$ . Трещина рассматривается в рамках PKN-приближения. Проницаемость матрицы меняется по таблице в зависимости от давления.

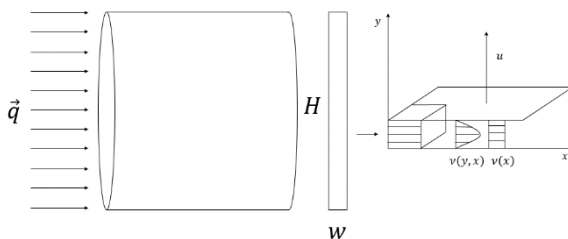


Рис. 1. Схема трещины

Запишем систему уравнений, представляющих PKN-модель.

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wv)}{\partial x} = 2u \\ v = -\frac{w^2}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \end{cases}$$

Здесь  $v$  – скорость потока жидкости в трещине,  $u$  – скорость потока жидкости из трещины в пласт,  $\mu$  – вязкость,  $P$  – давление.

Была проведена серия расчетов в лицензированных программных продуктах ПАО НК «Роснефть» РН-КИМ и РН-ВЕГА. Расчеты проводились при различных значениях давления раскрытия трещиноватости матрицы породы ( $\sigma_{min}$ ). По результатам расчетов выявлены эффекты влияния давления раскрытия трещиноватости матрицы породы на кривые падения давления. Получено что, когда давление в магистральной трещине ниже давления раскрытия трещиноватости матрицы породы, то режим течения диагностируется, как линейный в трещине; когда давление в трещине выше давления раскрытия трещиноватости матрицы породы, то режим течения диагностируется, как билинейный режим переходящий в линейный.

На диагностических кривых по G-функции показано выявление эффекта перехода от нелинейной фильтрации внутри трещины к трещине с постоянной проницаемостью.

### Литература

1. Андреев Е.Ю., Байков В.А., Борщук О.С. О моделях геометрически сложных трещин и стимулированного объема пласта при его гидравлическом разрыве // Нефтяное хозяйство. – 2024. – № 9. – С. 70-74.

УДК 532.49

### ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В КОНЕЧНОЙ ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Башмаков Р.А.<sup>1,2</sup>, Шамматова А.А.<sup>3</sup>, Пангаева А.О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>2</sup>ООО «ФРАК ГРАДИЕНТ», Уфа, Россия

<sup>3</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Bashmakov\_Rustem@mail.ru

Рассмотрим вертикальную нефтяную скважину длины  $L$ . Предположим, что симметрично вдоль оси скважины расположена трещина, полученная путем гидроразрыва пласта (ГРП). Мы будем представлять трещину в виде очень узкого параллелепипеда, толщины (ширины)  $d_f$ , полудлины  $l$  ( $d_f \ll l$ ) и высоты  $h$ . Предполагается, что трещина закреплена, стенки неподвижны, полудлина  $l$  не меняется при изменении давления, давление в трещине мало меняется в зависимости от глубины (это предположение позволяет отказаться от координаты по вертикали).

В скважину закачивается жидкость, которая через перфорационные отверстия попадает в трещину ГРП, а затем перетекает в пласт перпендикулярно стенкам трещины. В работе для определенности мы рассматриваем нагнетательную скважину. Случай добывающей скважины отличается сменой знака в изменении давления и расхода.

Описание динамики давления в трещине давалось в целом ряде работ (напр., [1] – [3]) при предположении о бесконечной длине трещины  $l = \infty$ . В данной работе рассматривается трещина конечной длины.

### **Литература**

1. Cinco LH., Samaniego VF., Dominguez AN. Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture //Society of Petroleum Engineers Journal. – 1978. – Т. 18. – № 04. – С. 253-264.
2. Нагаева З.М. Об упругом режиме фильтрации в трещине, расположенной в нефтяном или газовом пласте / З.М. Нагаева, В.Ш. Шагапов // Прикладная математика и механика. – 2017. – Т. 81, № 3. – С. 319-329.
3. Хабибуллин И.Л. Нестационарная фильтрация в пласте с трещиной гидроразрыва / И.Л. Хабибуллин, А.А. Хисамов // Известия РАН. Механика жидкости и газа, – 2019, № 5. – С. 6-14.

УДК 532, 519.6

### **ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В МИКРОКАНАЛАХ С МАССИВОМ СТОЛБИКОВ**

Биккинина Н.Б., Солнышкина О.А., Булатова А.З.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

nazgulbay@mail.ru

В связи с развитием микроэлектронной промышленности актуальной является проблема эффективного охлаждения устройств. Целью данной работы является подбор оптимальной внутренней геометрии каналов микротеплообменников для эффективного отвода тепла со стенок электронных чипов. Рассматривается процесс отвода тепла с внутренней поверхности микроканала, состоящего из множества микроразмерных столбиков, под действием потока жидкости при заданном постоянном перепаде давления. Моделирование проводится в CFD симуляторе Ansys Fluent. В более ранней работе [1] авторы изучили гидродинамику течения в аналогичных структурах, используя ускоренный быстрым методом мультиполей численный подход на основе метода граничных элементов, реализованный на гетерогенных архитектурах, но анализ проводился без учета теплопередачи и в более узком интервале перепадов давления. В ходе исследования получены поля скорости течения жидкости (рис. 1) в

микроканалах, а также распределение температуры. Показано влияние внутренней структуры микроканала и расхода жидкости на эффективность отвода тепла.

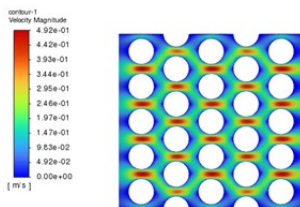


Рис. 1. Поле скорости в микроканале с массивом столбиков

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ 24-19-00697, <https://rscf.ru/project/24-19-00697/>).

### Литература

1. Биккина Н.Б., Курбанова С.С., Солнышкина О.А. Влияние пространственного распределения элементов внутренней структуры микроканала на гидродинамические характеристики потока жидкости // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50. – № 23. – С. 46-49.

УДК 532

### ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ СТРУКТУР МИКРОТЕПЛООБМЕННИКОВ НА ПРОЦЕССЫ МАССОПЕРЕНОСА

Булатова А.З., Солнышкина О.А., Биккина Н.Б.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

[bulatova29@yandex.ru](mailto:bulatova29@yandex.ru)

Микротеплообменники — это компактные устройства для эффективного теплообмена, широко применяемые в различных отраслях промышленности, включая химию, авиацию, электронику и строительство. Рост плотности теплового потока современных микросхем делает охлаждение критически важным фактором надежности оборудования. Эффективность охлаждения повышается благодаря использованию микроканальных теплообменников с малыми элементами (столбиками), увеличивающими контактную поверхность и улучшающими теплоперенос. Открытые типы микротеплообменников, где высота столбиков ниже основного канала, обладают меньшей массой и обеспечивают лучшее распределение охлаждающей жидкости, демонстрируя повышенную тепловую эффективность на 5–10%.

В данной работе проведено численное моделирование особенностей гидродинамических потоков в открытом типе микроканала. Расчеты проводились для каналов с различной высотой столбиков — 50% и 75% от общей высоты, а также изучалось влияние разных расстояний между ними ( $\Delta = 20, 25, 30, 35$  мкм). Для решения задачи использовался подход, основанный на ускоренном методе граничных элементов. Более подробная математическая постановка задачи описана в работе [1].

В ходе расчетов получены качественные картины течения, а также продольные, поперечные и вертикальные компоненты поля скорости в различных плоскостях сечения канала. Показано, что уменьшение высоты столбиков в канале значительно влияет на рост продольной и поперечной компонент скорости, а также увеличивает относительный объемный расход.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ 24-19-00697, <https://rscf.ru/project/24-19-00697/>).

### Литература

1. Булатова А.З., Туйгунова Д.М., Солнышкина О.А. Трехмерное моделирование течений в микроканалах с системой детерминированного бокового смещения методом граничных элементов // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50, № 23. – С. 42-45.

УДК 532

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ, ПРОХОДЯЩЕМ ЧЕРЕЗ ГАЗОГИДРАТНЫЙ МАССИВ, ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Валеев Д.Ф.<sup>1</sup>, Чиглинцева А.С.<sup>2</sup>, Русинов А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Бирский филиал Уфимского университета науки и технологий,

Бирск, Россия

<sup>2</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

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

Основной целью работы является разработка математической модели и проведение численного анализа движения газового (или газожидкостного) потока в вертикальном канале, расположенном в газогидратном массиве, а также исследование влияния термобарических условий и параметров нагрева на процессы разложения гидрата.

Объектом исследования является процесс движения газа и динамическое изменение геометрии вертикального канала в газогидратном массиве. Для достижения поставленных задач сформулирована система квазиодномерных уравнений, описывающих изменения давления, температуры и массовых расходов фаз вдоль канала, а также температурное поле в прилегающем массиве. Основные методы включают применение метода стрельбы и других численных методов для решения краевых задач с последовательным итеративным учётом изменения радиуса канала и процессов теплопроводности.

Полученные математические модели позволяют анализировать влияние термобарических условий на дебит газа и скорость разрушения газогидратной стенки, а также определять оптимальные параметры нагрева, такие как температура, локализация электрического нагревателя и общий уровень мощности. Обобщённые фактические данные подтверждают эффективность предложенного подхода, позволяющего описать процессы теплопроводности, фазовые переходы (газогидрат  $\rightarrow$  газ + вода) и динамику изменения геометрии канала при интенсивном разложении гидрата.

На основе проведённого исследования рекомендуется применять разработанные математические модели и расчётные алгоритмы при проектировании технологических схем освоения месторождений газовых гидратов, а также при разработке методик утилизации или хранения газогидратных систем. Практическая значимость работы заключается в возможности оценить перспективы технологий термического воздействия на газогидратные пласты для получения газа или предотвращения засорения газовых скважин гидратами.

#### **Литература**

1. Чиглинцева А. С. Математическое моделирование процесса образования и разложения газогидрата в различных средах: магистерская диссертация. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021. 88 с.
2. Шагапов В. Ш., Сыртланов В. Р., Галиакбарова Э. В. Математическая модель фильтрации газа и воды в полубесконечном пористом пласте при разложении газогидратов вследствие нагрева и депрессии // Журнал прикладной механики и технической физики. 2014. Т. 55, № 2. С. 107-115.
3. Русинов А. А. Моделирование тепломассопереноса при разложении газогидратных систем в пористых коллекторах. Казань: Изд-во «Фэн», 2019. 150 с.
4. Тазетдинов Б. И. Моделирование процесса течения газа в канале, содержащем лёд, сопровождаемого его тепловым разрушением // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10, № 1. С. 31-38.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ  
СЕТКАХ ВОРОНОГО В ПК «РН-ВЕГА»

Валеева Ю.Р., Бикбулатова Г.Р., Сарапулова В.В.

ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

ValeevaYR@bnipi.rosneft.ru

Гидродинамические исследования скважин (ГДИС) являются важным инструментом для оценки фильтрационных свойств и энергетического состояния пласта.

В связи с увеличением доли разрабатываемых месторождений с трудноизвлекаемыми запасами актуальными становятся задачи, связанные с исследованиями скважин, эксплуатирующих многослойные пласты с изменяющимся типом флюида по пласту (например, при разработке нефтяной оторочки с газовой шапкой, нефтяных пластов с подстилающей водой). Таким образом, растет потребность в эффективных программных инструментах для учета интерференции скважин и граничных условий при интерпретации ГДИС.

Расчет параметров системы «пласт-скважина-границы» при наличии скважин окружения и сложных геологических условий является трудоемкой задачей. Инновационный наукоемкий программный комплекс «РН-ВЕГА» (ПК «РН-ВЕГА») включает передовые наработки в области математического моделирования, обширный функционал, удобный и понятный интерфейс. В частности, в базовой версии ПК «РН-ВЕГА» реализована функциональная возможность построения численной модели, учитывающей многофазность течения, многослойность пласта, прорывы газа и воды, влияние скважин окружения и границ.

Гидродинамические расчеты в ПК «РН-ВЕГА» выполняются на неструктурированных сетках Вороного. Сетки Вороного позволяют построить детальную численную модель за счет измельчения расчетной области в прискважинной зоне и вблизи трещин, границ (Рис. 1).

Проведена апробация функционала по построению численной модели в ПК «РН-ВЕГА» на примере интерпретации ГДИС в нефтяных вертикальных и горизонтальных скважинах, пробуренных на месторождении с нефтяной оторочкой.

Выполнено сравнение результатов численных экспериментов с аналитическим решением и промысловыми данными, которое показало, что корректно настроенная численная модель позволяет оценить значения характеристик системы «пласт-скважина-границы» с учетом

многофазного потока в пласте, многослойности пласта, образования конусов газа и воды.

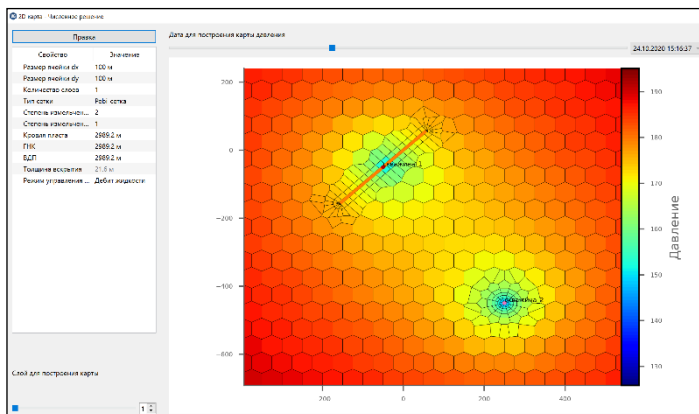


Рис. 1. Результаты численного моделирования в ПК «РН-ВЕГА»

УДК 532

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ НЕФТЕШЛАМОВЫХ ЭМУЛЬСИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ

Валиуллина В.И., Галеев Р.Р., Зиннатуллин Р.Р.

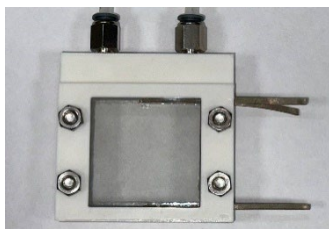
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

valiullina.vilena@mail.ru

В настоящее время загрязнение нефтепродуктами почвы и водоемов в процессе эксплуатации нефтяных месторождений является важной проблемой, поэтому необходимо найти способы наиболее эффективного разделения образующихся нефтешламовых эмульсий.

В качестве объекта исследования использовалась дисперсная система, состоящая из нефти и воды с включениями песчаных частиц. Для исследования влияния электромагнитного поля на динамику расслоения нефтешламовых эмульсий была создана экспериментальная установка, основной частью которой являлась специальная ячейка с вытравленными на проводящем стекле «зубчатыми» электродами (рис. 1).





*Рис. 1. Фото экспериментальной ячейки*

Электромагнитное поле создавалось с помощью линейного усилителя и генератора сигналов AG1021. В ходе экспериментов процесс фиксировался на камеру с макрообъективом Tamron SP 90 mm в ручном режиме с выдержкой 1/100 с, диафрагмой f/9, ISO 200.

В ходе экспериментов было замечено, что воздействие электромагнитного поля способствует более быстрой коагуляции и коалесценции капель из-за разрушения бронирующих межфазных оболочек системы. Из проведенных исследований можно сделать вывод, что электромагнитное поле позволяет повысить эффективность очистки нефти от примесей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00181.

УДК536.24.083

# РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЁРДЫХ ВЕЩЕСТВ ПО ДАННЫМ ТЕМПА СВОБОДНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ

Васильев М.К., Усманов Б.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

maksim.pups2004@gmail.com

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью измерения теплоёмкости различных горных пород.

В рамках данной работы была разработана экспериментальная методика для измерения теплоёмкости по данным динамики охлаждения: нагрев образца производился в нагревательном шкафу; далее образец подвешивался на стойке с помощью нити; замер температуры образца по мере его охлаждения производился тепловизором.

Анализ темпа охлаждения позволил определить теплоёмкость образца. Для этого был применён закон Ньютона-Рихмана [1]:

$$T(t) = T_{\text{окр}} + (T_0 - T_{\text{окр}}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

где  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды,  $T_0$  – начальная температура тела,  $t$  – время,  $\tau$  – временная константа (показатель экспоненты), выражаемая как:

$$\tau = \frac{m \times c}{h \times A} \quad (2)$$

где  $m$  – масса,  $c$  – удельная теплоёмкость,  $A$  – площадь всей поверхности,  $h$  – коэффициент теплоотдачи.

Замерив температурную динамику исследуемого образца во время охлаждения, можно найти показатель экспоненты. Это, в свою очередь, при известных значениях прочих параметров, позволит найти теплоёмкость:

$$c = \frac{m \times \tau}{h \times A} \quad (3)$$

Были проведены экспериментальные исследования темпа охлаждения образца горной породы. Полученные данные температурной динамики были аппроксимированы аналитической кривой (1), что позволило найти значение показателя экспоненты  $\tau$ . Затем, по формуле (3) была рассчитана теплоёмкость. Её значение составило:

$$c = (480 \pm 20) \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}, \varepsilon = 4,2\%, \alpha = 0,95$$

### Литература

1. Sir Isaac Newton. (1701VII). Scala graduumcalorisPhil. Trans. R. Soc.22, 824-829.

УДК 550.8.

### ОЦЕНКА ХАРАКТЕРА НАСЫЩЕННОСТИ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ СО СЛОЖНЫМ ТИПОМ ПОРИСТОСТИ

Вахитова Г.Р., Сахаутдинова Э.Р., Прая Э.Д.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

vakhitovagr@uust.ru

Коллекторы со сложной структурой пористости (трещиноватые, порово-трещиноватые), содержащие около 40% мировых запасов нефти, широко представлены в мире. Однако их освоение из-за неоднородного строения и выраженной анизотропии проницаемости осложнено. Для эффективной разработки подобного рода продуктивных отложений необходима достоверная интерпретация геофизических исследований скважин (ГИС) совместно с анализом образцов керна. В то же время, довольно часто интерпретация данных ГИС выполняется в условиях недостаточного объема исходных данных: неполного комплекса ГИС, отсутствия керна, либо его непредставительности, что усложняет количественную оценку коллекторов.

В связи с этим, цель работы заключается в определении петрофизических параметров и оценке насыщенности в порово-трещиноватых коллекторах кунгурского яруса Цветаевского месторождения [1].

Основные запасы нефти кунгурского яруса сосредоточены в порово-трещинных породах: известняках и мергелях. Согласно анализу образцов керна их пористость изменяется от 0,4 до 11,1%, а проницаемость составляет менее 0,001 мкм<sup>2</sup>. Продуктивный интервал разреза характеризуется развитой системой трещин. Пористость трещин и высокое сопротивление карбонатных пород затрудняют расчет коэффициента нефтенасыщенности по уравнению Арчи-Дахнова.

В этой связи, в работе для оценки коэффициента насыщенности в порово-трещиноватых коллекторах применен графический способ [2]. Сопоставление удельного электрического сопротивления и пористости демонстрируют сложный тип пористости за счет присутствия пор, каверн и трещин, что влияет на диапазон изменения значений константы  $m$  уравнения Арчи-Дахнова.

При помощи полученной палетки для условий кунгурских карбонатов со сложным типом пористости сделана оценка коэффициента насыщенности и характера насыщенности коллекторов.

Результаты исследований были использованы для пересчета и уточнения запасов нефти продуктивных отложений кунгурского яруса Цветаевского месторождения.

В качестве рекомендаций можно отметить необходимость дополнительных исследований керна, включающих капиллярные кривые для оценки распределения флюидов, компьютерную томографию для выявления трещин и каверн, гидродинамические испытания пластов, а также специальные методы ГИС с высоким вертикальным разрешением [3].

### Литература

1. Вахитова Г.Р., Лысцева Т.С., Труфанова Л.Д. Совместная интерпретация геофизической, петрофизической и геологопромысловой информации в сложных коллекторах Цветаевского месторождения углеводородов // Каротажник. – 2011. – № 7. – С. 12-20.
2. Bateman R. M. Formation evaluation with pre-digital well logs. – Elsevier, 2020.
3. Сидорчук А.И., Рыскаль О.Е. Прогнозирование и оценка трещинной пористости по комплексу новых методов ГИС // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. – 2003. – № 113. – С. 141-151.

УДК 532.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ В СКВАЖИНАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ЗАКАНЧИВАНИЯ

Волкова К.Е.<sup>1,2</sup>, Евлампиев Я.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>2</sup>ООО «Уфимский НТЦ», Уфа, Россия

kristinavolk549@gmail.com

Контроль за энергетическим состоянием пласта подразумевает проведение ГДИС, которые как правило сопровождаются остановкой скважин, что в свою очередь влечет за собой потерю добычи нефти. Решение данного вопроса принято осуществлять за счет опорного фонда скважин. Однако этот подход не учитывает неоднородность пласта, снижая качество данных.

В связи с этим, актуальным является вопрос, связанный с необходимостью учета неравномерной выработки месторождения.

Целью работы является исследование динамики поведения пластового давления и скорости выработки запасов в зависимости от типа заканчивания скважин.

В данной работе выполнен анализ темпов снижения пластового давления для вертикальной скважины и скважины с ГРП. Проведен анализ чувствительности темпов снижения пластового давления в зависимости от показателя проницаемости пласта.

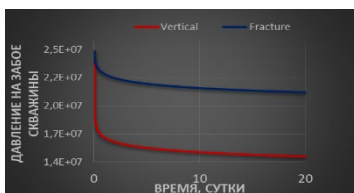


Рис. 1. Распределение давления на забое скважины для двух типов заканчивания

На основе анализа профилей давления и дебита установлено, что тип заканчивания скважины оказывает значительное влияние на скорость снижения давления и скорость выработки пласта (рис.1).

Результаты проведенных исследований позволяют определить некоторые количественные показатели разработки месторождения.

### Литература

1. Хабибуллин И., Хисамов А. А. К теории билинейного режима фильтрации в пластах с трещинами гидроразрыва // Вестник Башкирского университета. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 958- 963.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ НА  
СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ КАПЛИ

Галеева Д.Р., Киреев В.Н.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Lara\_wood@mail.ru

В работе исследуется скорость горячей капли, движущейся в плоском канале, заполненном жидкостью с аномальной зависимостью вязкости от температуры. Деформация капли в потоке жидкости моделируется с помощью системы уравнений Кана-Хилларда-Навье-Стокса [1], в котором граница раздела сред имеет малую, но конечную толщину.

Аномальная зависимость вязкости от температуры характерна тем, что в канале образуется высоковязкая область – вязкий барьер [2]. Для расчетов была рассмотрена изотермически горячая жидкость без вязкого барьера ( $A=0$ ), а также термовязкие жидкости с вязкими барьерами ( $A = 5, A = 10$ ).

На рис. 1 показана зависимость относительной скорости капли  $U_{dn}$  от времени для капиллярного числа  $Ca=0.1$ . Видно, что к моменту выхода из канала капля имеет установившуюся скорость. Однако, когда в канале присутствует вязкий барьер, он влияет на скорость капли: в некоторый момент времени скорость локально возрастает, а затем снижается до установившегося значения.

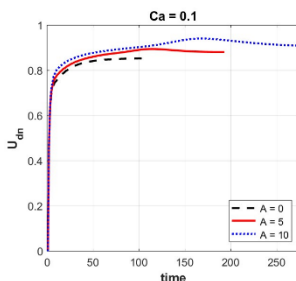


Рис. 1. Относительная скорость капли  $U_{dn}$  во времени

**Литература**

1. Badalassi V. E., Cenicerros H. D., Banerjee S. Computation of multiphase systems with phase field models //Journal of computational physics. – 2003. – Т. 190. – №. 2. – С. 371-397.
2. Галеева Д. Р., Киреев В. Н., Урманчиев С. Ф. Влияние теплообмена на гидравлическое сопротивление при течении термовязкой жидкости в коническом диффузоре // Вестник Башкирского университета. – 2022. – Т. 27. – № 4. – С. 852-857.

УДК 532

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СБОРКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

Галеев Р.Р., Зиннатуллин Р.Р., Валиуллина В.И.  
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
galeevr93@gmail.com

Разделение водонефтяных эмульсий зачастую осложняется наличием в них твердых включений, которые повышают их стабильность. Одним из перспективных методов решения данной задачи является воздействие электрическими полями на эмульсию, где за счет электрофоретических сил происходит коагуляция и коалесценция эмульсионных капель.

В настоящей работе произведены моделирование, сборка и экспериментальная проверка ячейки, в которой представлена возможность воздействия НЧ поля на находящуюся в ней эмульсию, с целью качественной оценки возможности применения данного метода для разделения эмульсии на её составляющие части.

Основным элементом лабораторной установки является экспериментальная ячейка на основе ИТО стекол. Благодаря использованию стекол, возможно наблюдать за течением процесса на протяжении всего эксперимента. Для реализации электромагнитного воздействия, на ИТО слое, путем фотолитографии и мокрого травления были изготовлены электроды пилообразной формы (рис. 1А) с межэлектродным пространством 200, 300 и 400 мкм. За счет пилообразной формы получается неоднородное поле на всей площади воздействия. Электроды покрыты электроизоляционным лаком для предотвращения короткого замыкания между ними при попадании флюидов в межэлектродное пространство. Каркас ячейки выполнен путем 3д печати из PLA пластмассы. Внутренние размеры ячейки 48\*48\*3 мм (Рис. 1Б).

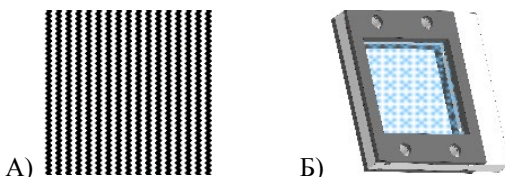


Рис. 1. Шаблон маски электродов (А), 3Д модель экспериментальной ячейки (Б)

Объектом исследования является водонефтяная эмульсия (10% массовой концентрации воды) с добавлением песка с размером частиц 125 мкм (10% весовой концентрации песка).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00181.

УДК 532.529:534.2

## К ТЕОРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТВОЛА СКВАЖИНЫ АКУСТИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ

Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р.

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

Emi.galiakbar@yandex.ru

Технология ГРП в совокупности с акустическими и физико-химическими методами воздействия на низкопроницаемые пласты позволяет возобновить работу старых скважин, восстановленных после консервации.

Рассматривается задача акустического сканирования межтрубной зоны между стенкой скважины и трубой НКТ, которая заполнена акустически сжимаемой жидкостью, с закрытой нижней частью. Предполагается, что на устье скважины в жидкости создается импульсный сигнал конечной длительности, при распространении которого вязкость и теплопроводность проявляются в тонком пограничном слое. Задача состоит из 2-ух этапов. На 1-ом этапе определяется площадь поврежденного участка скважины по зависимостям времени полураспада давления при опрессовке [1] с учетом коэффициента пьезопроводности пласта, параметров жидкости и скважины. На 2-ом этапе строится динамика импульсного сигнала в межтрубной зоне по дисперсионным уравнениям [2], коэффициентам отражения и прохождения [3] от области повреждений. Отдельно изучается задача обнаружения склеротических отложений на стенках скважины.

Показана возможность определения местоположения повреждений стенки скважины акустическим сканированием.

### Литература

1. Хакимова З.Р. К теории акустического сканирования наземных и подземных трубопроводов и резервуаров: автореф. Дис. ... канд. физ.-мат. наук: спец. 01.02.05 / З.Р. Хакимова. БашГУ. – Уфа. 2020. – 24 с.
2. Шагапов В.Ш., Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р. К теории акустического зондирования трубчатых каналов, содержащих участки с нарушением герметичности // ИФЖ. 2018. Т. 91. № 3. С. 709-719.
3. Шагапов В.Ш., Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р. К теории акустического сканирования повреждений подземных трубопроводов // АЖ. 2021. Т. 67. № 6. С. 583-594.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ПДМС-ЧИПАХ В  
ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ**

Галиева К.А.<sup>1</sup>, Солнышкина О.А.<sup>1</sup>, Батыршин Э.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>2</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

espscnart@gmail.com

На фоне постоянного развития и усложнения электронных девайсов, конструирование микротеплообменников является актуальной проблемой, решение которой способно предотвратить множество поломок, связанных с перегревом устройств. Пропускная способность микрофлюидного устройства, определяемая геометрией внутренней структуры теплообменника, является важным параметром, влияющим на скорости рабочей жидкости внутри чипа, следовательно, может помочь в решении одной из оптимизационных задач в области теплообмена, связанной с сокращением потребления устройством хладагента.

В рамках данной работы проведено экспериментальное и численное исследование влияния изменения внутренней структуры чипа на гидродинамические характеристики потока однофазной жидкости. В первую очередь была проведена серия экспериментов для чипов, изготовленных при помощи методов мягкой литографии, из оптически прозрачного вещества - сшитого полимера полидиметилсилоксана (ПДМС) с целью изучения влияния геометрии внутренней структуры микротеплообменника на перераспределение потока, а также зависимости объемного расхода флюида от заданного перепада давления. Более подробно детали эксперимента и установки описаны в статьях [1-3].

Геометрии чипов представляют собой однородные структуры цилиндрических микростолбов диаметрами 110 мкм, а также структуры с двумя масштабами распределения столбиков, которые формируются из групп по 4 элемента. Варьировался не только масштаб упаковки столбиков, но также и расстояние между ними. Высота каналов во всех случаях составляла около 25 мкм. С помощью методов трассерной визуализации потоков были построены двумерные поля и гистограммы распределения скоростей.

Используемый в данной работе численный подход основывается на трехмерном ускоренном методе граничных элементов [4-5]. Для проведения численного анализа влияния параметров пространственного распределения столбиков разработана качественная триангуляция всех



микроканалов и проведены соответствующие расчеты, которые показали хорошее согласование полей скоростей.

В результате показано, что случай с равномерным распределением микропинов обладает более высокой пропускной способностью, то есть большим расходом флюида при заданном перепаде давления. Определенные параметры двойной пористости, оказывающие значительное влияние на гидравлическое сопротивление областей устройств, могут в значительной степени сократить объемный расход флюида, но не всегда являются эффективными с точки зрения тепло- и массопереноса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00697, <https://rscf.ru/project/24-19-00697/>

### **Литература**

1. Zamula Y. S. et al. Experimental study of the multiphase flow in a pore doublet model // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1421. – № 1. – С. 012052.
2. Batyrshin E. S., Solnyshkina O. A., Pityuk Y. A. Study of the features of double porosity media impregnation // *Technical Physics*. – 2021. – Т. 66. – № 4. – С. 543-547.
3. Galieva K. et al. Experimental analysis of fluid dynamics in microchannels featuring two-scale fin pin arrays // *EPJ Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2025. – Т. 321. – С. 01006.
4. Солнышкина О.А. и др. Трехмерное моделирование динамики деформируемых капель эмульсии методом граничных элементов и быстрым методом мультиполей на гетерогенных вычислительных системах // *Вычислительные методы и программирование*. – 2013. – Т. 14. – № 4. – С. 438-450.
5. Солнышкина О.А., Фаткуллина Н.Б., Булатова А.З. Трёхмерное моделирование однофазных и многофазных течений в микроканалах с неровностями // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2023. – Т. 26. – № 2. – С. 130-141.

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ТЕЧЕНИИ КУЭТТА-ТЕЙЛОРА

Гизатуллина Э.И., Киреев В.Н.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
egizatullina100@gmail.com

Течение Куэтта-Тейлора имеет многочисленные практические применения. Например, этот тип течения встречается в системах смазки подшипников с вращающимися валами, а также используется для получения тепловой энергии в устройствах, в которых энергия ветра преобразуется в тепло [1].

В данной работе рассматривается задача о ламинарном течении Куэтта-Тейлора между двумя вращающимися соосными цилиндрами радиусов  $R$  и  $aR$  ( $a < 1$ ) при малых угловых скоростях  $\omega_0$  и  $\omega_1$  (Рис. 1).

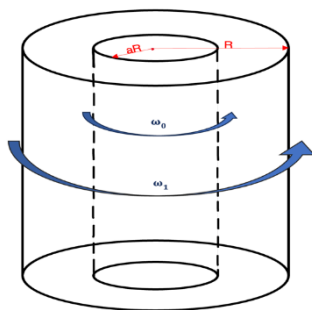


Рис. 1. Схема течения

Математическая модель течения состоит из уравнения неразрывности и уравнений Навье-Стокса, записанных в цилиндрической системе координат. Используя упрощающие предположения и соответствующие граничные условия аналитическое решение для тангенциальной скорости  $\vartheta_\varphi(r)$  принимает вид:

$$\frac{\vartheta_\varphi(r)}{\omega_0 R} = \frac{a^2}{1-a^2} \left( \frac{R}{r} - \frac{r}{R} \right). \quad (1)$$

В работе, используя решение (1) было получено выражение для крутящего момента, необходимого для вращения внутреннего цилиндра длиной  $L$ . Построены графики для скорости и крутящего момента.

## Литература

1. Мамонов В.Н., Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Генерация тепла в мультицилиндровой системе Куэтта-Тейлора // Теплофизика и аэромеханика, 2019, Т. 26, № 5. С. 729-739.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АНОДНОГО СКЛЕИВАНИЯ: РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРИЛОЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Гимадеев А.В., Гарифуллин И.Ш., Солнышкина О.А., Батыршин Э.С.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

amma412332411@gmail.com

Анодное склеивание представляет собой метод соединения различных материалов, который находит широкое применение в микроэлектронике, оптоэлектронике и других областях, требующих высококачественных и надежных соединений. Исследования показывают, что оптимизация температуры и приложенного напряжения может значительно улучшить прочность склеивания. В рамках данной работы изучался процесс анодного склеивания кремний/стекло, влияние температуры и приложенного напряжения на прочность склеивания.

Для изучения прочности склеивания использовались боросиликатные стекла (Voronfloat 33) толщиной 1.1 мм и кремний с кристаллографической ориентацией (100) толщиной 460 мкм. Перед склейкой образцы обрабатывались в ультразвуковой ванне раствором пирании и ополаскивались водой, с последующей сушкой в конвекционной печи. Была собрана экспериментальная установка, которая состоит из нагревательной плиты, электродов, источника. Температура менялась в диапазоне от 250°C до 400°C, а приложенное напряжение в диапазоне от 400 В до 1000 В. Перед склеиванием сэндвича электроды/кремний/стекло нагревался до заданной температуры. Когда температура достигала заданного значения, приступали к анодному склеиванию путем приложения постоянного напряжения. На протяжении всего процесса склеивания фиксировалось изменение тока. После склеивания образцы неконтролируемо остужались до комнатной температуры. Далее склеенные образцы фотографировались и производилась предварительная оценка качества склейки в результате анализа изображений с помощью программного пакета ImageJ. Затем образцы подвергались растяжению на установке для измерения прочности склеивания.

В рамках работы получены зависимости прочности склеивания от приложенного напряжения и температуры. В дальнейшем полученные данные будут использоваться для изготовления микрофлюидных чипов кремний/стекло.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ 24-19-00697, <https://rscf.ru/project/24-19-00697/>).

УДК 535.31, 681.7, 53.082.5

## ФОРМИРОВАНИЕ ЛИНЗОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Гордеева А.И., Корнилин Д.А., Нурмухаметов Д.И., Пономарёв Р.С.  
Пермский государственный национальный Исследовательский  
университет, Пермь, Россия  
gordeeva@psu.ru

На сегодняшний день существует проблема согласования мод излучения, распространяющегося по одномодовым оптическим волоконным световодам и канальных волноводов в чипе фотонной интегральной схемы (ФИС). Автоматизацию и упрощение процесса сборки ФИС можно осуществить с использованием линзованных оптических волокон. Одним из подходов к формированию таких волокон является метод химического травления. В работе рассматривается возможность ускорения технологического цикла путем осуществления его под действием гидродинамических течений.

Контролируемые течения в среде травителя в эксперименте создавались путем пропускания через исследуемое волокно инфракрасного излучения различной длиной волны и интенсивности. Конвективные потоки, генерируемые излучением, позволяли управлять не только скоростью процесса, но и воздействовать на форму конических структур, образующихся на торце оптических волокон, – аксиконов.

В ходе работы экспериментально было установлено, что наиболее стабильно процесс травления протекает при температуре окружающей среды и используемых жидкостей 40 °С, для исключения вытравливания волокна выше формирующегося конуса минимальная высота буферного слоя должна составлять не менее 8 мм, заглубление торца прямого скола приводит к замедлению процесса травления, использование мощности излучения выше критического значения приводит к нарушению формы аксикона и ухудшению оптических свойств заготовок, использование оптического делителя с большим числом разветвлений позволяет увеличить число изготавливаемых волокон в одном технологическом цикле, для получения заготовок правильной формы при одновременном травлении нескольких волокон под действием лазерного излучения волокна необходимо располагать на достаточном друг от друга расстоянии для формирования симметричного относительно световода восходящего потока в кислотной среде.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-91-21001.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРАТА МЕТАНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Давлетшина М.Р.

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

davletshina@yandex.ru

Целью данного исследования является численное исследование процесса разложения гидрата метана при тепловом воздействии. Для этого необходимо построение математической модели, описывающей процесс разложения гидратного пласта [1,2]. Полученные решения позволят анализировать различные режимы теплового воздействия с точки зрения энергоэффективности при добыче метана и целесообразности освоения таких залежей.

В работе исследуется процесс разложения газогидрата путем решения задачи о фазовых переходах при постоянном потоке тепла. Для радиальной задачи с фронтальной границей фазовых переходов будут построены решения, описывающие поля температур, а также динамику движения границы разложения гидрата и массового расхода газа. Это позволит анализировать эффективность разработки гидратного пласта за счет прогревания рабочей зоны месторождения, используя различные источники тепловой энергии. Будет построена теоретическая модель для количественной оценки отбора метана при изменении температуры нагрева, перепада давления и определения наиболее выгодных режимов с точки зрения энергоэффективности [2].

В работе предлагается технологическая схема горизонтальной скважины, пробуренной в центре гидратного пласта, на которой действует тепловой источник постоянной мощности [3].

Результаты данного исследования позволят развить теоретические основы новых технологий для добычи газа из газогидратных месторождений, транспортировки и хранения углеводородного сырья.

### Литература

1. Бондарев Э.А., Максимов А.М., Цыпкин Г.Г. К математическому моделированию диссоциации газовых гидратов // Докл. АН СССР. – 1989. – Т. 308. – № 3. – С. 575.
2. Шагапов, В.Ш. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа / В.Ш. Шагапов, Н.Г. Мусакаев. – М.: Наука, 2016. – 238 с.
3. Шагапов В.Ш., Давлетшина М.Р. К вопросу разработки гидратного пласта тепловым воздействием // Теплофизика высоких температур. 2022, Т. 60, № 1. С. 131-138.

МОДЕЛИ МАССОПЕРЕНОСА ПАРОВ КРЕМНИЯ ОТ РАСПЛАВА  
К ИЗДЕЛИЮ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО ВАКУУМАДемин В.А.<sup>1</sup>, Демина Т.В.<sup>1,2</sup>, Игошев С.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский  
университет, Пермь, Россия<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия  
demin@psu.ru

В [1] для описания транспорта газообразного кремния от зеркала расплава к углеродному изделию в условиях среднего вакуума было получено и апробировано новое нелинейное уравнение, объясняющее наблюдающийся в эксперименте аномально сильный перенос пара, который невозможно смоделировать с помощью классического уравнения диффузии. В [2] проведено решение этой же задачи на основе полной системы уравнений газодинамики. Сопоставление результатов расчетов показало хорошее качественное и количественное согласие этих моделей.

Данные трехмерного численного моделирования на основе нового нелинейного уравнения диффузии паров кремния в ходе высокотемпературного силицирования углеродной заготовки и сравнение с результатами расчетов согласно классическому уравнению диффузии представлены на рис. 1.

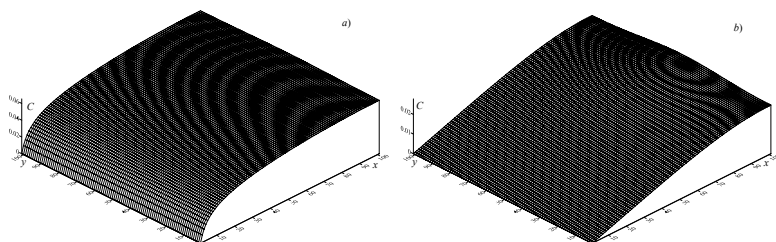


Рис. 1. Поля концентрации паров кремния в установившемся режиме в кубической полости в разрезе по высоте чуть выше середины: а) – модифицированное уравнение, б) – уравнение классической диффузии

Решение одномерной задачи переноса с помощью обоих подходов продемонстрировано на рис. 2. Видно, что кривые 1, 2 и 3 качественно схожи и дают выпуклый профиль концентрации кремния в реторте, в то время как уравнение классической диффузии дает линейный профиль (штриховая линия), противоречащий экспериментальным данным.

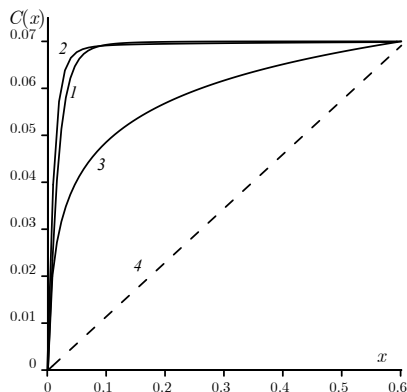


Рис. 2. Профили концентрации, полученные в рамках разных подходов; 1, 2 – решения с учетом перераспределения несущего газа аргона [2], соответственно, когда зеркало расплава параллельно изделию или расположено горизонтально; 3 – решение модифицированного уравнения диффузии [1] при условии, что аргон распределен равномерно в реторте; 4 – решение согласно классическому уравнению диффузии

Расчеты показывают, что на поверхности изделия возникает достаточно сильный напорный градиент давления паров, способный обеспечить насыщение пористого углеродного волокна кремнием, что имеет место в эксперименте.

Работа поддержана бюджетной темой № 124021600038-9.

### Литература

1. Демин В.А., Демина Т.В., Марышев Б.С. Физико-математическая модель переноса газообразного кремния в ходе высокотемпературного силицирования углеродных композитных материалов // Вестник Пермского университета. Физика. 2022, № 3. С. 48-55.
2. Демин В.А., Игошев С.А. К вопросу о газодинамической модели высокотемпературного силицирования пористых углеродных материалов // Известия РАН, Механика жидкости и газа. 2025, № 2. С. 63-74.

АПРОБАЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО РАСХОДОМЕРА НА ОСНОВЕ  
АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В  
МЕХАНИЗИРОВАННЫХ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИНАХ НА  
ЦИФРОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ «АНК «БАШНЕФТЬ»

Еникеев Р.М.<sup>1</sup>, Палагута А.А.<sup>1</sup>, Акрамов И.Р.<sup>2</sup>, Давлетбаев А.Я.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>ПАО АНК «Башнефть», г. Уфа, Россия

<sup>2</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия,

<sup>3</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

IR\_Akramov@BNIPI.rosneft.ru

Одной из актуальных проблем на нефтяных месторождениях является недостаток непрерывных замеров дебита скважин. В отдельных случаях может отсутствовать начальный участок и др. Отсутствие корректных замеров осложняет анализ и мониторинг разработки. Для решения этой задачи апробирован алгоритм «виртуального расходомера», реализованный в ПК «РН-ВЕГА» [1]. Апробация алгоритма проведена на механизированных скважинах, которые оснащены установками электроцентробежного насоса (УЭЦН).

Алгоритм «виртуального расходомера» использует данные о забойном давлении, параметрах работы УЭЦН и др. В алгоритме применялись расширенные признаки, которые учитывают фильтрационные течения в пласте, основанные на законе Дарси, признаки Хорна [2] и др. Выполнено восстановление внутренних участков данных дебита с различными длительностями и с соотношением обучающей и тестовой выборок 80% к 20%. Оценка качества работы виртуального расходомера производилась по метрикам MAE (средняя абсолютная ошибка) и MAPE (средняя абсолютная ошибка в процентах).

Проведенная апробация на 97 скважинах подтвердила эффективность алгоритмов «виртуального расходомера» (MAPE составила около 3%). Для повышения достоверности алгоритма планируется расширить обучающую выборку, в т.ч. дополнить другими промысловыми данными.

### Литература

1. Сагдеев Э.И. и др. Апробация подхода к восстановлению замеров дебита жидкости механизированных скважин с применением методов машинного обучения в программном комплексе «РН-ВЕГА» // Нефтяное хозяйство. 2024. № 4. С. 42 -48.
2. Tian C., Horne R.N. Machine Learning Applied to Multiwell Test Analysis and Flow Rate Reconstruction // SPE – 175059-MS – 2015.



# РАСЧЕТ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ В АППАРАТАХ ВИХРЕВОГО ТИПА

Еникеев И.Х.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

enickeev.iX@yandex.ru

Закрученные потоки многофазных сред широко используются в современной технике (аппараты химической технологии, турбомашин, криогеника и т.д.) для интенсификации процессов тепло-массообмена и разделения фаз. Особое распространение получили аппараты вихревого типа, в которых в качестве рабочего тела наиболее часто встречаются два типа гетерогенных сред: 1) газо- и парокапельные потоки; 2) газозвеси (газ, содержащий во взвешенном состоянии сухие или влажные твердые частицы). Для исследования гидродинамики вышеуказанных гетерогенных сред в аппаратах вихревого типа используются, как феноменологические модели, так и стохастические, основанные на уравнениях Больцмана. В данной работе использовалась модель взаимопроникающих континуумов [1], основанная на предположении о сплошной структуре, как несущей газовой фазы, так и дисперсных твердых частиц. Дисперсная фаза рассматривалась как совокупность фракций частиц, различающихся друг от друга по размерам и концентрациям. В качестве исходного устройства рассматривался аппарат со встречными закрученными, схема которого представлена на рис.1.

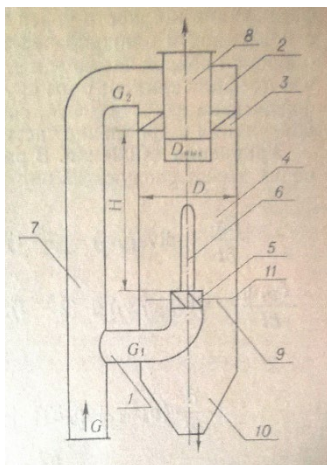


Рис. 1. Принципиальная схема аппарата со встречными закрученными потоками

Как показано на рис.1, АВЗП представляет собой вертикальный цилиндрический корпус, в нижнюю и верхнюю часть которого через аксиально-лопаточный завихритель подается запыленный поток (соответственно). В цилиндрической части аппарата происходит взаимодействие закрученных потоков в результате чего, частицы разных фракций отбрасываются к боковым стенкам аппарата и попадают в бункер для сбора уловленной пыли (на рисунке он указан цифрой 10), а чистый без частиц пыли газовый поток выводится наружу через выходной патрубок 8 [2,3]. Расчет параметров взаимодействия несущей и дисперсной фазы производился в предположении малой массовой концентрации частиц, что позволило расщепить исходную систему дифференциальных уравнений на две подсистемы и уравнения для несущей среды интегрировать отдельно от уравнений для дисперсной фазы. В этом случае движение частиц разных фракций происходит в заданном поле скоростей газовой среды, что существенно упрощает решение задачи [4]. В результате интегрирования системы дифференциальных уравнений были получены значения скоростей и концентраций дисперсных фракций в рабочей зоне аппарата, что позволило рассчитать эффективность очистки промышленных выбросов для заданных физико-механических свойств, подаваемого в аппарат запыленного потока.

### Литература

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М., изд. Наука. 1987. Т. 1.
2. Еникеев И.Х. Расчет сушки влажных частиц в аппаратах со встречными закрученными потоками // Инж.-физ. журн. 1991. Т. 61, № 5. С.770-777.
3. Еникеев И.Х., Кузнецова О.Ф., Полянский В.А., Шургалский Э.Ф. Численное моделирование двухфазных закрученных течений в областях сложной формы // Журнал выч. матем. и матем. Физики. 1989. № 1. С. 90-96.
4. Еникеев И.Х. Расчет дозвуковых газодисперсных потоков в криволинейных каналах методом крупных частиц // Теор. основы хим. технол. 2006. Т. 40. № 1. С. 85-94.

В данной работе рассматривается задача о пульсирующем ламинарном течении крови в артерии. Целью работы является нахождение аналитического решения для данного течения, моделирование профилей скорости и их анализ.

Для нахождения аналитического решения были сформулированы две модели – физическая и математическая. Физическая модель представляет собой цилиндрическую артерию радиуса  $r_0$  и длины  $L$ . Математическая модель течения состоит из уравнения неразрывности и уравнений Навье-Стокса, записанных в цилиндрической системе координат.

В результате получаем следующее аналитическое решение.

$$u = \frac{A^* r_0^2}{i \mu \alpha^2} \left[ 1 - \frac{J_0(\alpha i^{3/2} \frac{r}{r_0})}{J_0(\alpha i^{3/2})} \right] e^{i \omega t},$$

где  $\mu = \rho \cdot \nu$  – динамическая вязкость,  $\alpha = r_0 \sqrt{\omega / \nu}$  – число Уомерсли,  $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

В результате были получены профили скорости в артерии в различные моменты времени. На рис. 1 показаны характерные профили скорости. Можно видеть, что вид профиля скорости отличается от параболического распределения Пуазейля.

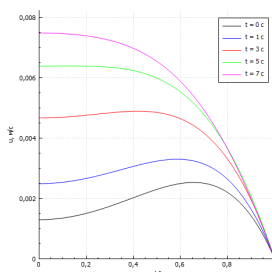


Рис. 1. Профили скорости в артерии

### Литература

1. Womersley J. R. Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known // The Journal of physiology. – 1955. – Т. 127. – № 3. – С. 553.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В СКВАЖИНЕ  
С ТРЕЩИНОЙ КОНЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИЕфимова М.В.<sup>1,2</sup>, Давлетбаев А.Я.<sup>1,2</sup><sup>1</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа

MV\_Efimova2@BNIPI.rosneft.ru

В ряде случаев в низкопроницаемых коллекторах и на месторождениях с высоковязкой нефтью проявляется эффект нелинейной фильтрации [1-2]. Для описания фильтрации с начальным градиентом давления предлагается использовать приближение закона фильтрации с учетом коэффициента эффективной проницаемости от градиента давления [3].

Скорость фильтрации в трещинах гидроразрыва пласта и продуктивном пласте описываются модифицированным законом Дарси:

$$v = \frac{k}{\mu} a(G) \frac{\partial P}{\partial x}$$
$$a(G) = 1 - \frac{G_0}{G} ((1 - \exp(-\frac{G_0}{G}))$$

Здесь  $a(G)$  – безразмерный коэффициент, учитывающий нелинейную фильтрацию от градиента давления  $G$ ,  $G_0$  – начальный градиент давления.

В работе рассчитаны кривые изменения давления в скважинах с трещиной конечной проводимости для различных значений начального градиента давления. Получено, что при учете эффекта нелинейной фильтрации с увеличением наклона логарифмической производной на Log-Log графике отмечается увеличение наклона по кривой изменения давления и ее логарифмической производной.

**Литература**

1. Мирзаджанзаде А.Х., Аметов И.М., Ковалев А.Г. Физика нефтяного и газового пласта: учебник для вузов // М.: Недра, 1992. 270 с.
2. Байков В.А., Колонских А.В., Макастров А.К., Политов М.Е., Телин А.Г. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Лабораторные фильтрационные исследования керна Приобского месторождения // Научно-технический вестник «НК «Роснефть». 2013. № 2, вып. 31 (апрель-июнь). С. 4-7.
3. Алишаев М.Г., Розенберг М.Д., Теслюк Е.В. Неизотермическая фильтрация при разработке нефтяных месторождений // М.: Недра, 1985. 271 с.

УДК 532.5; 519.6

## ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ДОБЫЧИ НА ОСНОВЕ «МАЛОЗАТРАТНЫХ» ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

Ефимова М.В.<sup>1,2</sup>, Ишкин Д.З.<sup>1,2</sup>, Давлетбаев А.Я.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>2</sup> ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

MV\_Efimova2@BNIPI.rosneft.ru

В рамках данной работы выполнена апробация «малозатратных» методов газодинамических исследований скважин (ГазДИ), реализованных в ПК «РН-ВЕГА». Методы были применены на сверхнизкопроницаемых газовых и газоконденсатных месторождениях, проведена оценка свойств пласта и восстановлена динамика изменения пластового давления. По полученным данным выполнен факторный анализ причин изменения дебита скважин, включающий в себя оценку влияния забойного давления, пластового давления и коэффициента продуктивности. Итогом работы является формирование перечня скважин-кандидатов на мероприятия по восстановлению дебита.

Проведение газодинамических исследований методом кривой восстановления давления в условиях низко- и сверхнизкопроницаемых газовых и газоконденсатных месторождений не гарантирует получение оценки параметров пласта и текущего пластового давления, по причине недослеженности, в связи с отсутствием псевдорadiaльного режима течения, а также не позволяет осуществлять полноценный контроль энергетического состояния [1-3]. В связи с этим рассматриваются альтернативные «малозатратные» методы исследований, одним из которых является анализ добычи и давлений (АДД). С помощью данного подхода представляется возможным определить параметры пласта без остановки скважины, проводить прогноз пластового давления [4] и оценивать эффективность проведенных геолого-технических мероприятий (ГТМ).

Объектом исследования являются скважины газоконденсатных месторождений X и Y. По результатам интерпретации динамических данных выполнена оценка динамики изменения пластового давления и определены параметры пласта, на основе чего выполнен факторный анализ (ФА) причин изменения дебита скважин с разложением на составляющие: пластовое давление (3), забойное давление (2) и коэффициент продуктивности (4), рассчитывающиеся по формулам [1]:

$$K_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{см}}}{m(P_{\text{пл}}) - m(P_{\text{заб}})} \quad (1)$$

$$\Delta q_{\text{см } m(P_{\text{заб}})} = -\frac{K_{\text{пр2}} + K_{\text{пр1}}}{2} (m(P_{\text{заб2}}) - m(P_{\text{заб1}})) \quad (2)$$

$$\Delta q_{\text{см } m(P_{\text{пл}})} = \frac{K_{\text{пр2}} + K_{\text{пр1}}}{2} (m(P_{\text{пл2}}) - m(P_{\text{пл1}})), \quad (3)$$

$$\Delta q_{\text{см } K_{\text{пр}}} = (K_{\text{пр2}} - K_{\text{пр1}}) \left( \frac{m(P_{\text{пл2}}) + m(P_{\text{пл1}})}{2} - \frac{m(P_{\text{заб2}}) + m(P_{\text{заб1}})}{2} \right) \quad (4)$$

где  $K_{\text{пр1}}$  – коэффициент продуктивности скважины в начальный период работы скважины, (Па/с)/(тыс.м3/сут);  $K_{\text{пр2}}$  – коэффициент продуктивности скважины на конечный период времени выполняемого анализа, (Па/с)/(тыс.м3/сут);  $m(P_{\text{пл}})$  и  $m(P_{\text{заб}})$  – пластовое и забойное давление в терминах функции псевдодавления [5], Па/с;  $\Delta q_{\text{см } m(P_{\text{заб}})}$  – изменение дебита скважины за счет забойного давления, тыс.м3/сут;  $\Delta q_{\text{см } m(P_{\text{пл}})}$  – изменение дебита скважины за счет пластового давления, тыс.м3/сут;  $\Delta q_{\text{см } K_{\text{пр}}}$  – изменение дебита скважины за счет продуктивности скважины, тыс.м3/сут.

Таким образом, результатом апробации «малозатратных» газодинамических исследований скважин на газовых и газоконденсатных месторождениях в ПК «РН-ВЕГА» является установление основных причин изменения дебита скважин, и увеличение охвата месторождения оценками пластового давления в 3 раза [6-7]. На основе выполненного анализа предложены скважины-кандидаты для проведения мероприятий, направленные на повышение дебита.

### Литература

1. Ишкин Д.З., Адельгузина Э.М., Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я., Ефимова М.В., Захаржевский Ю.А., Ромашкин С.В., Шаронов М.В., Архипов Ю.А., Лознюк О.А. Апробация подхода к подбору скважин-кандидатов на мероприятия в низкопроницаемых газовых пластах по результатам анализа добычи и давлений в ПК «РН-ВЕГА» // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 5. С. 86-90. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-5-86-90

2. Гидродинамические исследования скважин в низкопроницаемых коллекторах / А.Я. Давлетбаев, Г.Ф. Асалхузина, Р.Р. Уразов, В.В. Сарапулова. – Новосибирск: ООО «ДОМ МИРА», 2023. – 176 с.
3. Асалхузина Г.Ф., Бикметова А.Р., Кардопольцев А.С., Гатауллин Д.С., Салахов Т.Р., Давлетбаев А.Я., Губайдулин В.Р., Подливахин С.В., Лескин Ф.Ю., Басыров М.А., Сергейчев А.В.. Эволюция методов и масштабов гидродинамических исследований низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство. 2023. № 9. С. 108-111.
4. Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я., Салахов Т.Р., Лошак А.А., Губайдулин В.Р., Лескин Ф.Ю. Апробация подхода к оценке текущего пластового давления при анализе динамических данных эксплуатации скважин // Нефтяное хозяйство. 2022. №10. С. 30-33.
5. Давлетбаев А.Я., Мухаметова З.С. Фильтрация газа в низкопроницаемом коллекторе с трещиной гидроразрыва пласта // Прикладная механика и теоретическая физика. 2019. Т. 60. № 1. С. 41-53. DOI: 10.15372/PMTF20190106
6. Сарапулова В.В., Давлетбаев А.Я., Кунафин А.Ф. и др. Программный комплекс «РН-ВЕГА» для анализа и интерпретации результатов гидродинамических исследований скважин // Нефтяное хозяйство. 2023. № 12. С. 124-129.
7. <https://rn.digital/rnvega/>

УДК 532.73

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЭФИРОВ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ В НЕФТЕВОДОНАСЫЩЕННОМ ПЛАСТЕ

Жонин А.В.

ООО «АЛТИМ», Уфа, Россия  
[zhoninav@altim.ru](mailto:zhoninav@altim.ru)

В специальных индикаторных нефтепромысловых исследованиях используется закачка сложных эфиров карбоновых кислот (например:  $\text{HCOOCH}_3$ ,  $\text{HCOOC}_2\text{H}_5$ ,  $\text{CH}_3\text{COOCH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$  и т.п.). Полезный технологический эффект обеспечивается свойством совместной растворимости в нефти и воде, благодаря чему становится возможным решение обратной задачи по восстановлению текущей нефтенасыщенности [1]. Целью данной работы является постановка и исследование прямой задачи о динамике соответствующих химических веществ.

Рассматриваемая задача интересна тем, что помимо адвекции и диффузии существует процесс перераспределения эфира между водной и

нефтяной фазы. Кроме того, сложные эфиры карбоновых кислот претерпевают процесс гидролиза, в результате чего образуются соответствующие карбоновая кислота и спирт.

Двухфазная фильтрация вода-нефть рассматривается в рамках модели Баклея-Лeverетта. Перенос эфира, кислоты и спирта рассматривается в рамках адвекционно-диффузионной модели. Перераспределение эфира между водой и нефтью считается мгновенным процессом. Гидролиз задается соответствующим кинетическим уравнением. Решение полной задачи проводится численно в два этапа: на первом – фильтрационная задача, на втором – адвекционно-диффузионная.

В заключительной части работы моделируются различные, приближенные к практике случаи. Показано, что технически лимитирующим процессом является гидролиз, и в некоторых случаях, особенно при больших межскважинных расстояниях, индикаторное исследование может оказаться нерепрезентативным.

### **Литература**

1. Жонин А.В., Мухаметзянов Т.М., Ахтямов А.Р., Крянев С.Д. Определение остаточной нефтенасыщенности в межскважинном пространстве методом разделяющихся трассеров на Верхнесалымском месторождении // Тезисы конференции: Химические методы увеличения нефтеотдачи. Отраслевой вызов. – Казань. – 2024.

УДК 665.622.43

### **ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВОДОНЕФТЯНЫЕ ЭМУЛЬСИИ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ**

Зиннатуллин Р.Р., Валиуллина В.И., Галеев Р.Р.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

rasulz@yandex.ru

Присутствие механических примесей в водонефтяных эмульсиях (песка, глины, кальцита и т.д.) увеличивает их устойчивость, образуя стойкие промежуточные слои, что приводит к образованию нефтяных шламов. Механизм фазоразделения таких трехфазных эмульсий взаимосвязан: более полное удаление механических примесей с поверхности раздела в водную фазу приводит, в свою очередь, к облегчению коалесценции капель воды и снижению агрегативной и кинетической устойчивости эмульсии [1]. Для эффективного выделения механических примесей и воды из таких трехфазных эмульсий используются в основном химические композиции на основе



смачивателей и деэмульгаторов и центрифуги [2]. Для десорбции адсорбционного слоя с поверхности механических примесей и облегчения их перехода в водную фазу возможно использование электромагнитного поля. При этом степень взаимодействия электромагнитного поля с эмульсионной системой будет зависеть от её диэлектрических параметров.

В связи с чем, в данной работе исследуются диэлектрические параметры трехфазных эмульсий типа «нефть+вода+мех.примеси» при различных соотношениях и динамика их фазоразделения в электромагнитном поле.

Результаты исследований показали, что диэлектрические свойства исследуемых трехфазных эмульсионных систем зависят от их состава. Максимальная эффективность фазоразделения в электромагнитном поле достигается при содержании воды 40% (об.) при фиксированном содержании механических примесей 10% (вес.).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00181.

### **Литература**

1. Поздышев Т.Н. Стабилизация и разрушение нефтяных эмульсий. М // Недра. – 1982.
2. Сергиенко Н.Д. Исследование, разработка и внедрение процесса подготовки к переработке стойких высокообводненных водонефтяных эмульсий с повышенным содержанием механических примесей. – 2005.

УДК 532.5

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА В ПК «РН-КИМ»**

Зиннурова А.Т.<sup>1,2</sup>, Давлетбаев А.Я.<sup>1,2</sup>, Минибаев М.Р.<sup>1</sup>,  
Муллагалиев Б.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа

AT\_Zinnurova@BNIP.rosneft.ru

В скважинах с гидроразрывом пласта (ГРП) отмечается отличие эффективной от закрепленной длины трещины, которое может быть обусловлено ухудшением проводимости трещины ГРП [1]. Для исследования динамики продуктивности скважин с трещинами ГРП необходимо проведение численных исследований, в т.ч. процессов ухудшения фильтрационных свойств и проводимости трещин ГРП во времени.

В гидродинамическом симуляторе ПК «РН-КИМ» реализован функционал, позволяющий моделировать ухудшение проводимости трещин ГРП с помощью задания функций затухания проницаемости, полураскрытия и коэффициента проводимости, в зависимости от времени, дебита и накопленного притока флюидов в трещину.

Для проведения исследования была построена секторная модель участка реального месторождения, в которой моделировалось затухание трещины ГРП добывающей скважины. С помощью многовариантных расчетов построенной модели проведен анализ функций затухания трещин ГРП, с их коэффициентами, в зависимости от параметров работы скважин (время, дебит жидкости/нефти, накопленная добыча жидкости/нефти).

В результате подобранной зависимости затухания трещин и ее коэффициентов удалось добиться падения проводимости трещины ГРП и хорошей сходимости значений забойного давления с историческими данными. В будущем, для качественного описания работы скважин, кроме применения функций затухания планируется учитывать и другие факторы, влияющие на динамику притока жидкости и изменение забойного давления в скважине.

### **Литература**

1. Бикметова А.Р. и др. Оценка параметров трещин в горизонтальных скважинах с многостадийным гидроразрывом пласта путем настройки гидродинамической модели на результаты трассерных исследований // Нефтяное хозяйство. 2022. № 11. С. 118 -121.

УДК 622.279.3

### **АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПРОДУКТИВНОСТИ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ ФАЗОВЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ**

Иванаевская Е.С., Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,

Россия

katya.ivanaevskaya@mail.ru

Моделирование динамики газоконденсатных смесей зачастую связано с необходимостью учета сложного фазового поведения углеводородов. Для учета возможных фазовых переходов в таких потоках, как правило, используют композиционные модели флюидов, требующие больших вычислительных ресурсов [1]. Поэтому для оперативных инженерных расчетов, таких как предварительная оценка продуктивности скважины, подобные подходы оказываются сложными и трудоемкими. В связи с этим актуальной задачей становится разработка

алгоритма для оценки дебита газоконденсатной скважины без применения сложных гидродинамических моделей.

В работе предложен метод для расчета дебита газоконденсатной скважины, основанный на использовании относительных фазовых проницаемостей для учета подвижности фаз при многофазном течении. Предложенная модель обеспечивает необходимую точность расчетов при существенном упрощении процесса моделирования многофазных потоков.

Апробация предложенного алгоритма была проведена путем сравнения результатов с фактическими данными о дебитах газоконденсатных скважин, а также путем сопоставления с результатами моделирования в ПО tНавигатор.

Алгоритм расчета продуктивности газоконденсатных скважин, учитывающий подвижность флюидов реализован в виде программного кода на языке Python. Исследовано влияние относительных фазовых проницаемостей на точность расчета продуктивности скважин при двухфазной фильтрации. Разработанное решение обладает практическим потенциалом – алгоритм может быть интегрирован в веб-симуляторы гидравлического разрыва пласта и соляно-кислотной обработки для быстрой оценки прироста продуктивности скважин.

### Литература

1. Coats K.H. An equation of state compositional model // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1980. – Т. 20. – № 05. – С. 363-376.

УДК 532.546

### БИЛИНЕЙНОЕ ТЕЧЕНИЕ В СИСТЕМЕ «БЕСКОНЕЧНЫЙ ПЛАСТ- КОНЕЧНАЯ ТРЕЩИНА АВТО-ГРП»

Ильясов А.М.<sup>1</sup>, Киреев В.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

IlyasovAM@bnpi.rosneft.ru

Рассматривается задача о нестационарном билинейном течении ньютоновской жидкости в бесконечном пласте с вертикальной трещиной авто-ГРП конечной длины, соединяющей нагнетательную и добывающую скважину, причем добывающая скважина работает при постоянном давлении, а на нагнетательной скважине поддерживается постоянный расход. Данная работа продолжает исследование, начатое в работе [1], в которой и на нагнетательной, и на добывающей скважинах задавались постоянное давление.

Математическая модель состоит из уравнения пьезопроводности, в котором пренебрегается производными давления по координате вдоль трещины, уравнения сохранения массы жидкости в трещине с учетом утечки/притока в пласт через стенки трещины, линеаризованного уравнения течения несжимаемой жидкости в гидравлическом приближении с учетом проницаемых стенок канала, а также соответствующих постановке задачи начальных и граничных условий.

Используя метод преобразования Лапласа получены аналитические решения для нестационарных распределений давления и скорости течения в трещине, а также двумерного нестационарного поля давления в пласте. Определена область применимости полученных точных решений. Получено аналитическое выражение для фильтрационных утечек (притока) из трещины в пласт (из пласта), а также выведены уравнения траекторий течения жидкости в трещине и пласте. Предложена упрощённая модель течения в трещине, учитывающая утечки в пласт по формуле Картера, и получены аналитические решения для полей давления и скорости в трещине авто-ГРП. Показано, что решения по приближённой модели практически совпадают с решениями по полной модели для низкопроницаемых пластов, малых расходов закачки и трещин малой и средней ширины.

### **Литература**

1. Ильясов А.М., Киреев В.Н. Аналитическое решение задачи о билинейном течении в пласте с конечной трещиной авто-ГРП // ПММ. 2024. Т. 88. № 5. С. 722-737.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПО  
ПРОМЫСЛОВЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДАННЫМ В  
ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИНАХ В «РН-ВЕГА»

Ишмуратов Т.А.<sup>1</sup>, Ганиев Э.Э.<sup>1,2</sup>, Ибатулин А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>3</sup>АО «РОСПАН ИНТЕРНЕШНЛ», Новый Уренгой, Россия

IshmuratovTA@bnipi.rosneft.ru

На промысловых динамических данных в газоконденсатных скважинах диагностируется образование газовых гидратов. По этой причине в отдельных скважинах приостанавливается добыча газа и конденсата из-за гидратных отложений, вызывая тем самым производственные издержки [1]. Одним из наиболее простых решений по недопущению гидратных пробок является снижение равновесной температуры гидратообразования за счет подачи в скважину ингибитора. В данный момент самым распространённым на практике ингибитором является метанол. С целью оптимизации количества закачиваемого ингибитора в скважину необходима его оценка, которая зависит от многих факторов: конструкции скважины, свойств окружающей среды, пластовых и поверхностных условий, состава газоконденсатной смеси, наличия в воде растворенных минералов и т.д. Также необходимо учитывать, что при добыче в газоконденсатном потоке могут возникнуть фазовые переходы, т.к. давление и температура снижаются от забоя до устья скважины.

В программном комплексе «РН-ВЕГА» реализована математическая модель течения газоконденсатного флюида в вертикальной цилиндрической трубе, позволяющая определить давление и температуру в зависимости от глубины скважины [2]. Для различных входных данных даётся оценка образования гидратов, их место и скорость накопления. На основании полученных результатов, определяются условия, при котором в скважине гидраты образовываться не будут. Данный функционал в ПК «РН-ВЕГА» [3] позволяет идентифицировать образования гидратных отложений по промысловым динамическим данным давления и температуры.

### Литература

1. Старинец М.В., Засовская М.А. Газогидраты и методы борьбы с ними при эксплуатации газовых скважин // Современные проблемы развития европейского севера. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Изд.: Ухтинский ГТУ. С. 110-114.

2. Шагапов В.Ш. Мусакаев Н.Г., Уразов Р.Р. Математическая модель течения природного газа в трубопроводах с учетом диссоциации газогидратов // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 2. – С. 1-93.
3. Сарапулова В.В., Давлетбаев А.Я., Кунафин А.Ф., Уразов Р.Р., Нуриев А.Х., Зарафутдинов И.А., Абдуллин Р.И., Пестриков А.В., Ямалов И.Р. Программный комплекс «РН-ВЕГА» для анализа и интерпретации результатов гидродинамических исследований скважин // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 12. С. 124-129.

УДК 622-276

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА В БЛОКЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ РАНКА-ХИЛША

Ишмурзина Н.М.<sup>1,2</sup>, Михайленко К.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия  
nmvafina@mail.ru

Попутный нефтяной газ (ПНГ) состоит из метана и более тяжелых углеводородов – этана, пропана, бутана. В процессе подготовки ПНГ фракционируют на «сухие» и «жидкие углеводороды». «Сухой газ» состоит из метана и этана, которые в гомологическом ряду располагаются по соседству, поэтому трудно их расчлениить обычной сепарацией. Тем не менее, их нужно разделить, поскольку метан является энергетическим сырьем, этан – нефтехимическим.

Поставленная задача полного извлечения этана из состава ПНГ в промысловых условиях может быть реализована в устройстве для глубокого охлаждения природного газа и ПНГ с вихревой трубой Ранка-Хилша (ТРХ).

Разработана модель вихревой трубки в программном пакете OpenFOAM.

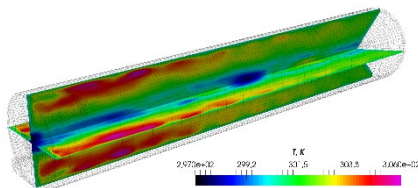


Рис. 1. ТРХ

Рис. 2. Распределение температуры в ТРХ

Получено «стандартное» распределение: горячий поток на периферии, холодный ближе к оси.

### Литература

1. Патент № 97277. Оpubл. 10.09.2010. Бюл. № 25. Ишмурзина Н.М.
2. Ишмурзина Н.М., Ишмурзин А.А. Механика дисперсных систем в нефтегазовом производстве: научное издание. – Уфа, 2012. – 260 с.

УДК 532.5.032

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

Каншаев Д.А., Киреев В.Н.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

d\_kanshaev@mail.ru

Точное понимание особенностей движения жидкости в условиях ламинарности важно для оптимизации конструкций каналов, снижения энергозатрат и повышения эффективности технологических процессов.

В данной работе рассматриваются задачи о ламинарном (устойчивом) потоке жидкости в цилиндрическом и кольцевом канале.

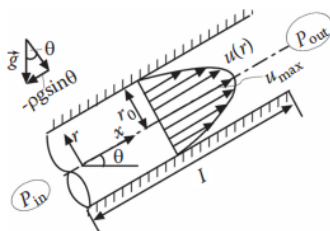


Рис. 1. Схема течения в цилиндрическом канале

Математическая модель течения жидкости в трубе, состоит из уравнения неразрывности и уравнений Навье-Стокса, записанных в цилиндрической системе координат. Используя гипотезы и граничные условия, все сводится к уравнению:

$$v(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{\Delta P}{L} (R^2 - r^2) \quad (1)$$

где  $v(r)$  - скорость течения по оси  $x$ .

Для математической модели течения жидкости в кольцевом канале рассмотрим поток через кольцевое пространство с радиусом трубы  $R$  и внутренним концентрическим цилиндром  $aR$ .

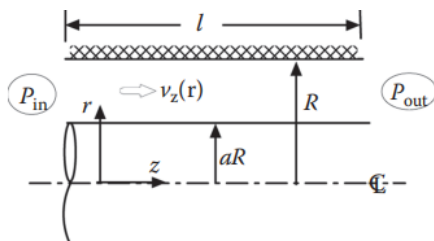


Рис. 2. Схема течения в кольцевом канале

Математическая модель течения жидкости в кольцевом канале, состоит из уравнения неразрывности и уравнений Навье-Стокса, записанных в цилиндрической системе координат. Используя гипотезы и граничные условия, все сводится к уравнению:

$$\vartheta_z = \frac{R^2}{4\mu} \frac{\Delta P}{L} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 - \frac{1-a^2}{\ln(1/a)} \ln \left( \frac{R}{r} \right) \right],$$

где  $\vartheta_z$  – скорость течения по оси z.

Полученные результаты позволяют проводить комплексный анализ гидродинамического поведения жидкости в широком диапазоне параметров, повысить точность проектирования конструкций и обеспечить оптимальный выбор рабочих режимов эксплуатации оборудования.

### Литература

1. Кондратов Д.В. и др. Математическое моделирование ламинарного движения жидкости в упругой цилиндрической трубе кольцевого профиля со свободным опиранием по торцам // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 1. – №. 1. – С. 33-40.
2. Хайруллин М.Р., Золотоносов Я.Д. Математическая модель ламинарного течения аномально-вязкой жидкости во вращающемся канале типа «Конфузор-диффузор» овального сечения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 3 (21). – С. 113-120.
3. Васильева Е. И. Математическое моделирование ламинарного течения вязкой среды в каналах произвольной формы: дис. – Сибирский государственный индустриальный университет, 2013.
4. Жидков А.В., Любимов А.К. Вычислительная гидродинамика. математические модели жидкостей и газов: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2021. – 42 с.



УДК 532.591:534-18

# АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ГРАНИЦАХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ И ГИДРАТОНАСЫЩЕННЫХ ПЕСЧАНИКОВ, ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Каримова Г.Р.<sup>1,2</sup>, Галиакбарова Э.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

gulnazkar69@gmail.com

Газогидраты – уникальный источник углеводородов, образующиеся при высоких давлениях и низких температурах в осадочных породах морского дна и континентальных склонах. Акустические исследования помогают понять структуру и их физические свойства, а также прогнозировать поведение акустических волн при разведке газогидратов.

В работе исследуется распространение плоских гармонических волн вертикальной и горизонтальной поляризации на границе раздела сред из водонасыщенного и гидратонасыщенного песчаника [1]. Модель описывает волновые процессы в упругих изотропных телах, учитывая векторные и скалярные потенциалы скоростей, смещения и напряжения. Проведен аналитический и численный анализ дисперсионных уравнений, применительно к экспериментальным данным [2]. Показано, что волна горизонтальной поляризации может распространяться без существенного затухания по слою песка, насыщенного водой, расположенному над песком, насыщенном газогидратом. Построена динамика волны с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье. Предлагается определять наличие газогидрата в насыщенном песке на дне водоемов акустическим зондированием на основании общей оценки глубины проникновения и изменения скорости волны.

## Литература

1. Галиакбарова Э.В., Каримова Г.Р. Поверхностные акустические волны на границе двух пористых сред (песок, насыщенный гидратом метана или водой (льдом)) // Уфимская осенняя математическая школа 2023. – 2023. – С. 207-208.
2. Дучков А.Д. и др. Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лёд или гидраты метана и тетрагидрофурана (лабораторные измерения) // Доклады академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российская академия наук», 2018. – Т. 478. – № 1. – С. 94-99.

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВЫТЕСНЕНИЯ ВЯЗКИХ НЕФТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ ТИПОВ СШИТЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ

Кравченко М.Н.<sup>1,2</sup>, Ларченко В.П.<sup>1</sup>, Чехов А.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

kravchenko.m@gubkin.ru

В условиях перехода к разработке месторождений тяжелых нефтей необходимо создание новых технологических решений, так как классические подходы (тепловые, химические) должны быть скорректированы с учетом высокой вязкости пластового флюида и низкой его подвижности. Основными направлениями исследований в настоящее время является подбор специальных реагентов, способных улучшить степень охвата, повысить подвижность нефти и снизить фактор остаточного фильтрационного сопротивления.

Базируясь на результатах реальных лабораторных и промысловых экспериментов авторами проведены серии расчетов с использованием оригинальных численных кодов, позволяющих оценить коэффициент вытеснения высоковязких нефтей при использовании агентов, включающими в качестве гелеобразующих компонентов новые типы водорастворимых полимеров с добавлением сшивателей на основе ацетата хрома, углеродных наночастиц, карбоксидных групп, снижающих термическую и механическую деструкцию, включения кремнеорганических комплексов для снижения сорбционной активности и повышения степени гидрофобизации. Подбор комплексных составов позволяет увеличить отмывающую способность вытесняющих агентов, тем самым повысить коэффициент нефтеизвлечения, исключив необходимость использования дополнительных ПАВ, что повышает экономическую эффективность технологии вытеснения.

Авторами разработаны новые подходы к моделированию с учетом изменения в динамике не только свойств всех подвижных фаз, их взаимодействия с минеральной матрицей, но и самого уравнения фильтрации, учитывающего вязкопластические свойства как высоковязкой нефти, так и вытесняющего агента [1].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-77-10081.

### Литература

1. Dieva N. et al. Overview of the application of physically informed neural networks to the problems of nonlinear fluid flow in porous media // Computation. – 2024. – Т. 12. – № 4. – С. 69.

УДК 519.685.4

## РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ФЛЮИДОВ НА ОСНОВЕ ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПЕНГА-РОБИНСОНА

Курбанова С.С.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

sabina\_kurbanova\_2004@mail.ru

В нефтяной промышленности точная информация о PVT-свойствах пластовых флюидов имеет большое значение для разработки и эксплуатации месторождений. Эти данные важны для определения запасов нефти и газа, а также для принятия обоснованных решений в процессе проектирования. На сегодняшний день, возникает необходимость адаптации существующих методов и разработки новых инструментов для анализа углеводородных смесей. Проектирование и мониторинг месторождений теперь активно используют специализированные программные комплексы, которые внедряют научные достижения в области моделирования. Ошибки в термодинамических расчетах могут иметь серьёзные последствия, что делает создание надёжных программных решений особенно актуальным. Анализ методов обоснования свойств пластовых углеводородов показывает, что нужно развивать математические модели и внедрять их в практику, чтобы принимать правильные решения в нефтяной отрасли.

Цель данной работы заключается в разработке алгоритма для расчета термодинамических свойств однофазной смеси углеводородов на основе уравнения состояния Пенга-Робинсона [1]. Основными задачами являются: создание алгоритма для расчета свойств однофазной смеси, его программирование и разработка блок-схемы калькулятора [2].

Разработка данного алгоритма создает основу для более глубоких исследований в области термодинамики и направлена на изучение и внедрение современных математических моделей в промышленные процессы нефтяной отрасли.

### Литература

1. Michelsen M. L. Calculation of multiphase equilibrium // Computers & chemical engineering. – 1994. – Т. 18. – № 7. – С. 545-550.
2. Pedersen K. S. et al. Phase behavior of petroleum reservoir fluids. – CRC press, 2006. 465 с.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА В СИСТЕМЕ СТЕРЖНЕЙ В ВИДЕ  
ГРАФА ТИПА «ДЕРЕВО»

Мартынова Ю.В.

ООО «Новые ресурсы», Москва, Россия

Busa1987@mail.ru

Целью настоящей работы является математическое моделирование распространения тепла в системе стержней в виде графа типа «дерево» в виде пучка линейных дифференциальных операторов. Исследована монотонная зависимость собственных значений операторного пучка от параметров граничных условий, на которой базируется алгоритм решения. Поставленная задача редуцирована к обратной спектральной задаче для операторов в конечномерном пространстве, для которой предложен алгоритм численного метода решения.

Рассматривается система из однородных стержней в виде произвольного графа типа «дерево», который не содержит циклов. На каждом из  $P$  линейных фрагментов сети, представляющих собой ребра графа, задается уравнение теплопроводности в стержне в случае отсутствия внешних тепловых источников. На свободных концах стержней помещены сосредоточенные теплоемкости и происходит теплообмен с соответствующим коэффициентом с внешней средой нулевой температуры. В каждой из внутренних вершин графа задаются условия непрерывности температуры и теплового баланса. Получена соответствующая краевая задача на собственные значения.

Предложенный метод математического моделирования отличается от известных тем, что позволяет определить  $m$  неизвестных параметров граничных условий с помощью ровно  $m$  собственных значений. Разработан и обоснован новый численный алгоритм вычисления параметров граничных условий по конечному набору заданных собственных значений, апробированный на аналитических решениях модельных задач. Разработан комплекс программ, позволяющий восстанавливать параметры граничных условий, например, значения сосредоточенных теплоемкостей, помещенных на концах стержней, и коэффициентов теплообмена с внешней средой.

### Литература

1. Мартынова Ю.В. On a heat propagation problem in a system of rods on a tree graph // Итоги науки и техники. «Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры». – 2021. – Т. 198. – С. 89-95.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПЛОСКИХ ЛАМИНАРНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ СТРУЙ

Маукаев И.И., Киреев В.Н.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

lldustop123@mail.ru

Струйные течения встречаются во многих природных явлениях (высотные ветры в атмосфере, океанические течения), а также используются в различных технических устройствах (печатающие головки струйных принтеров, инжекторы двигателей внутреннего сгорания, устройства для нанесения покрытий).

В данной работе рассматривается течение плоских ламинарных стационарных струй (Рис. 1).

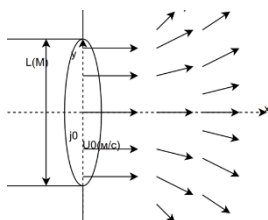


Рис. 1. Схема струйного течения

Математическая модель, описывающая установившееся течение ламинарной струи вязкой несжимаемой жидкости, вытекающей из длинной узкой щели, состоит из уравнений пограничного слоя [1]

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0,$$

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2},$$

и граничных условий

$$u_x(y = \pm\infty) = 0, \left. \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, u_y(y = 0) = 0,$$

где  $u_x$  и  $u_y$  — компоненты вектора скорости,  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости.

Используя известное аналитическое решение поставленной задачи [1], построены графики изменения толщины струи и распределения скоростей в струе. Показано, что расход струи по мере удаления от щели увеличивается, т.к. струя увлекает за собой окружающую жидкость.

## Литература

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

УДК 621.65.01, 004.942

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА ГАЗОВОЗДУШНЫХ СКОПЛЕНИЙ ИЗ ТРУБОПРОВОДОВ

Махмудова И.Ф., Ташбулатов Р.Р.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,  
Россия

Maxmudova\_indira@bk.ru

Целью исследования является повышение эффективности удаления газозвудушных скоплений из трубопроводов нефти и нефтепродуктов за счёт применения специальной «выносной» партии продукта, содержащей химические реагенты. В рамках работы поставлены задачи: разработка численной модели выноса скоплений, а также её верификация путём сравнения с теоретическими зависимостями, предложенными в трудах А.М. Нечваля и Г.Е. Коробкова [1].

Объектом исследования является процесс движения газозвудушного скопления в трубопроводе с переменным уклоном и заданной геометрией, имитирующей условия реальной эксплуатации. Моделирование выполнено в программном комплексе COMSOL Multiphysics с использованием физического интерфейса Two Phase Flow, Level Set, обеспечивающего точное отслеживание межфазной границы. В качестве методов использованы численные расчёты, основанные на уравнениях Навье–Стокса с применением модели турбулентности  $k-\epsilon$ . Геометрия модели соответствует лабораторному стенду, предполагающему проведение дальнейшей экспериментальной верификации.

Для оценки точности модели были проведены сравнительные расчёты с аналитическими зависимостями А.М. Нечваля и Г.Е. Коробкова: построен график зависимости угла наклона участка трубопровода от числа Рейнольдса, продемонстрировавший высокую сходимость теоретических и численных данных. Это подтверждает корректность разработанного подхода и его применимость для прогнозирования условий устойчивого выноса скоплений при различных параметрах транспортируемой среды.

### Литература

1. Коршак А.А., Нечваль А.М., Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов: Учебник для вузов. СПб.: Недра, 2008. 488 с.

УДК 622.276.6:532.5:004.942

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «FRAC VISION» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОУДАРА В СКВАЖИНАХ С ТРЕЩИНАМИ ГИДРОРАЗРЫВА

Махота А.А.<sup>1,2</sup>, Башмаков Р.А.<sup>1,2</sup>, Кашапов Д.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>2</sup>ООО «ФРАК ГРАДИЕНТ», Уфа, Россия

allarum@mail.ru

Программный комплекс «FracVision» разработан для оперативного контроля операций гидроразрыва пласта (ГРП) и анализа данных высокочастотных измерений давления в нефтяных скважинах. Основная цель проекта — обеспечить автоматизированную интерпретацию хаммер-эффекта (гидроудара) и определение параметров трещин ГРП в режиме реального времени.

Ключевые функциональные возможности:

- Визуализация и обработка данных;
- Отрисовка конструкций наклонно-направленных и горизонтальных скважин.
- Импорт данных различных форматов (нагнетательные тесты, стадии ГРП).
- Построение графиков с функциями масштабирования и сравнения.
- Анализ хаммер-эффекта.
- Определение ключевых параметров: частоты колебаний, коэффициента затухания, декремента затухания, мгновенного давления закрытия (ISIP).
- Мониторинг многостадийного ГРП (МГРП):
- Идентификация точек инициации трещин при повторном ГРП на основе анализа высокочастотных данных (шаг  $\leq 10^{-2}$  с).
- Расчет скорости распространения акустических волн и интерпретация отраженных/поглощенных сигналов.

Научная новизна:

- Интеграция методов спектрального анализа для сопоставления графиков гидроудара и характеристик трещин.
- Алгоритмы автоматизированного определения геометрии трещин по данным затухающих колебаний.

Практическая значимость:

Комплекс позволяет оперативно корректировать параметры ГРП, минимизировать риски неконтролируемого роста трещин и оптимизировать процессы многостадийного разрыва. Результаты тестирования модуля демонстрируют высокую точность определения ISIP.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО ОТВОДА В МИКРОФЛЮИДНЫХ  
ЧИПАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕДНЫХ ПЛАСТИН  
С МИКРОКАНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ**

Мечников В.А., Батыршин К.Э., Солнышкина О.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
vm06147884@gmail.com

В последние годы в микроэлектронике всё больше актуальна проблема перегрева процессоров [1]. Отвод тепла, в связи с технологическим прогрессом, усложняется. Этим обусловлен высокий интерес инженеров к разработке жидкостных микромасштабных охлаждающих систем. Существует необходимость использования жидкостного охлаждения и контроля распределения температуры. Структура микроканалов теплообменника имеет решающее значение, так как она одновременно должна обеспечивать максимально возможную поверхность теплопередачи и приемлемые гидродинамические потери на прокачку теплоносителя [2].

В рамках данной работы проведено экспериментальное исследование теплопереноса в микротеплообменниках. Было изготовлено несколько микрофлюидных чипов на основе медных пластин. К теплообменнику подключались трубки для подвода и отвода теплоносителя. Термодпары устанавливались для измерения температуры теплоносителя на входе и выходе из теплообменника. Показания с термодпар считывались с помощью устройства ввода-вывода NI USB-6356. Данные выводились на компьютер. Подача теплоносителя производилась при постоянном давлении. Полученные результаты анализировались и рассчитывались параметры, характеризующие теплообменники: число Нуссельта, число Рейнольдса, средняя теплопередача и термическое сопротивление.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ 24-19-00697, <https://rscf.ru/project/24-19-00697/>)

**Литература**

1. Abbas T., Abd-Elsalam K. M., Khodairy K. H. CPU thermal management of Personal and notebook computer (Transient study) // 2010 3rd international conference on thermal issues in emerging technologies theory and applications. – IEEE, 2010. – С. 85-93.
2. Dixit T., Ghosh I. Review of micro-and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Т. 41. – С. 1298-1311.



# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ С ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА КОНЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Мирзаянова Э.М.<sup>1</sup>, Ильясов А.М.<sup>1</sup>, Давлетбаев А.Я.<sup>1,2</sup>,  
Сарапулова В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

ЕМ\_Mirzayanova@bnipti.rosneft.ru

В данной работе рассматриваются два аналитических решения для расчета давления в вертикальной скважине с трещиной гидроразрыва пласта конечной проводимости при билинейном течении:

- 1) Решение «1», 1978 год для закреплённой трещины ГРП [1]

$$P_{wf}(t) = P_{init} - \frac{1.2254B\mu}{\pi hk\sqrt{F_{cd}x_f}} \left( \frac{k}{\phi\mu\beta_*} \right)^{1/4} q_0 t^{1/4} \quad (1)$$

- 2) Решение «2», 2024 год для незакреплённой трещины авто-ГРП [2]

$$P_{wf}(t) = P_{init} - 0.5516 \frac{(1-\phi)^{1/2} q_0 B \mu^{3/4}}{h \beta_*^{1/4} k^{3/4} \sqrt{F_{cd} x_f}} t^{1/4} \quad (2)$$

где  $P_{wf}$  – забойное давление, МПа,  $P_{init}$  – давление в трещине в начальный момент времени, МПа,  $B$  – объемный коэффициент, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $\mu$  – динамическая вязкость нефти, Па·с,  $h$  – мощность продуктивного пласта, м,  $k$  – проницаемость пласта, м<sup>2</sup>,  $F_{cd} = k_f w / (k x_f)$  – безразмерная проводимость трещины,  $x_f$  – полудлина трещины, м,  $\phi$  – пористость пласта, д.ед.,  $q_0$  – дебит, м<sup>3</sup>/с,  $t$  – длительность работы скважины, с,  $w$  – раскрытие трещины, м,  $k_f$  – проницаемость трещины, м<sup>2</sup>,  $\beta_*$  – общая сжимаемость системы, Па<sup>-1</sup>.

В результате сравнения решений 1 и 2 установлено, что для характерной пористости пласта в диапазоне от 0.05 до 0.35 относительная разница в расчете давления изменяется в диапазоне от 14% до 50%.

## Литература

1. Cinco L H., Samaniego V F., Dominguez A N. Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1978. – Т. 18. – № 04. – С. 253-264.
2. Ильясов А. М., Киреев В. Н. Аналитическое решение задачи о нагнетании или снижении пластового давления в коллекторе с трещиной // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2024. – № 2. – С. 23-34.

УДК 531.537

## РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАТУХАНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА

Муллагалимов Р.Х., Усманов Б.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

rustammullagaliamov22@gmail.com

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью разработки новых лабораторных установок для обучения студентов и школьников основам механики.

В рамках данной работы рассматривался процесс затухания свободных колебаний физического маятника под действием силы сопротивления воздуха. Для этого была разработана специальная лабораторная установка: тело колебаний – шарик с известным диаметром – был подвешен на тонкой нити в двух точках для фиксации плоскости колебаний; через положение равновесия маятника проходил лазерный луч, направленный на светодатчик; плата Arduino MEGA фиксировала время перекрытия луча по изменениям в показаниях светодатчика. На основе этих данных рассчитывалась скорость маятника в положении равновесия.

Скорость маятника в положении равновесия по мере затухания его колебаний описывается следующим выражением [1]:

$$\ln|v(t_{low})| = -\gamma t_{low} + \ln(v_m) \quad (1)$$

где  $\gamma = c/(2m)$  – коэффициент затухания колебаний маятника,  $c$  – коэффициент сопротивления воздуха,  $m$  – масса тела колебания,  $t_{low}$  – время прохождения через положение равновесия,  $v_m$  – максимальная скорость маятника.

Экспериментальные данные зависимости натурального логарифма скорости маятника в положении равновесия от времени были аппроксимированы выражением (1), что позволило определить значение коэффициента затухания  $\gamma$ , а затем и коэффициента сопротивления воздуха  $c$ . Его значение составило:

$$c = (33,5 \pm 0,745) * 10^{-5} \text{ кг/с}, \varepsilon = 2,2\%, \alpha = 0,95.$$

### Литература

1. Lee K. R., Ju Y. G. Measurement of resistance coefficients of pendulum motion with balls of various sizes //arXiv preprint arXiv:2002.03796. – 2020.

УДК 532.685

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЧКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В НАСЫЩЕННЫЙ ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ С НЕОДНОРОДНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Мусакаев Н.Г., Бельских Д.С.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Тюмень, Россия  
musakaev68@yandex.ru

Одной из целей развития современной промышленности, нацеленной на низкоуглеродную энергетику, является уменьшение эмиссии диоксида углерода в земную атмосферу. По ряду причин одним из доступных решений по смягчению последствий глобальных выбросов диоксида углерода является его секвестрация в истощенных нефтяных и/или газовых резервуарах в твердой газогидратной форме с использованием технологий улавливания, утилизации и хранения этого парникового газа.

Оценка эффективности геологического газогидратного хранения диоксида углерода требует тщательного предварительного изучения, в том числе, необходимы математическое моделирование и численные эксперименты. В работе для неоднородного по проницаемости пласта, насыщенного в исходном состоянии водометановой смесью, для процесса закачки  $\text{CO}_2$  в этот пласт предложена математическая модель газожидкостной фильтрации, которая в отличие от работы [1] дополнительно учитывает растворимость газа в воде и теплообмен рассматриваемого пористого коллектора с окружающими горными породами. Рассмотрено влияние параметров закачиваемого диоксида углерода и характеристик зонально-неоднородного пласта (начальные значения давления и температуры, коллекторские свойства пласта, исходная водонасыщенность и т.д.) на распределения температуры, давления, насыщенностей фаз в пористом коллекторе. Показано, что для принятых в работе расчетных параметров образование газогидрата происходит в протяженной области пласта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00093, <https://rscf.ru/project/24-29-00093/>.

### Литература

1. Musakaev N. G., Borodin S. L. Mathematical modeling of the gas hydrate formation process in a zonal heterogeneous porous reservoir // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2021. – Т. 42. – С. 2205-2210.

УДК 532

# КВАЗИМОНОДИСПЕРСНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАССЛОЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ЭМУЛЬСИОННОЙ СИСТЕМЫ

Мусин А.А., Юлмухаметова Р.Р.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

musinaa@uust.ru

Эффективное разделение водонефтяных эмульсий представляет собой важную технологическую задачу в нефтедобывающей отрасли, поскольку их наличие существенно повышает эксплуатационные расходы и создает технические сложности. Среди методов разделения эмульсий гравитационное расслоение занимает особое место как наиболее простой и экономически выгодный способ.

Целью данной работы является численное исследование изотермического расслоения полидисперсной эмульсионной системы под действием силы тяжести с учетом распределения капель по размерам. Моделирование проводится для высокоустойчивой эмульсии, где исключены процессы коалесценции и дробления капель. Для моделирования предлагается подход, основанный на представлении полидисперсной системы как совокупности квазимонодисперсных систем [1].

В результате моделирования показано, что для адекватного математического описания расслоения полидисперсных эмульсий достаточно рассмотреть четыре подсистемы. Совместный анализ экспериментальных данных осаждения капель полидисперсной эмульсии и результатов математического моделирования с использованием квазимонодисперсного подхода позволяет оценить объемное содержание капель разного размера в исходной эмульсии.

Данный подход хорошо применим в инженерных расчетах для оценки содержания капель разного размера в дисперсных системах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-11-00298.

## Литература

1. Мусин А.А., Валиуллина В.И., Юлмухаметова Р.Р., Ковалева Л.А. Экспериментальное и численное исследование изотермического расслоения полидисперсной эмульсии с применением квазимонодисперсного подхода // Инженерно-физический журнал. – 2024. – Т. 97. № 4. – С. 901-909.

УДК 532.546

## ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЛАСТА НА ПРИТОК ГАЗА К СКВАЖИНАМ С ТРЕЩИНАМИ ГИДРОРАЗРЫВА

Мухаметова З.С., Ковалева Л.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
muchametovaz@mail.ru

В данной работе исследуется влияние горизонтальной анизотропии проницаемости продуктивного пласта на процесс фильтрации газа в низкопроницаемом пласте с трещинами гидроразрыва. Моделируется приток газа к четырем скважинам с трещинами гидроразрыва в элементе низкопроницаемого газового пласта. Для учета изменения свойств газа в задаче используется уравнение состояния Пенга-Робинсона [1]. Математическая модель процесса включает уравнения пьезопроводности для каждой скважины с трещиной ГРП [2]. В начальный момент времени в продуктивном пласте и в трещинах задаются постоянные начальные давления. Выполняются условия непрерывности потока через поверхности трещин и условия непрерывности давлений на поверхностях «трещины-пласт». Во всех скважинах поддерживается постоянное забойное давление.

На рис. 1 показано влияние соотношений проницаемостей  $k_{mx}/k_{my}$  на распределение давления в низкопроницаемом пласте при полудлинах трещин ГРП  $x_{ff} = 200$  м, проницаемостях трещин  $k_{ff} = 100 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ . Перепад давления между скважинами и начальным пластовым давлением составляет 10 МПа, коэффициент проницаемости пласта вдоль оси  $y$   $k_{my} = 0.1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ .

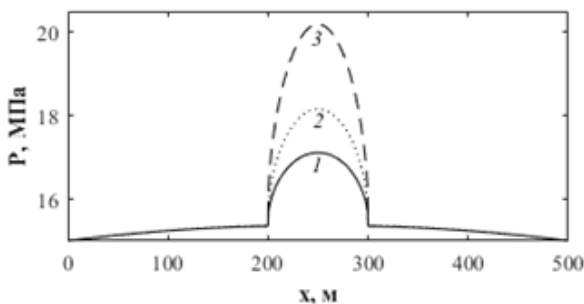


Рис. 1. Профили давления в направлении развития трещин для различных соотношений  $k_{mx}/k_{my}$ : 1 - 1; 2 - 0.5; 3 - 0.2

Из рис. 1 видно, что чем меньше отношение  $k_{m_x}/k_{m_y}$ , тем медленнее снижается давление в продуктивном пласте. Полученный результат следует учитывать при проектировании систем разработки и прогнозирования притока газа в скважинах с трещинами ГРП, в противном случае величины притока газа к скважинам без учета анизотропии будут завышены.

### Литература

1. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа //М.: Грааль. – 2002. – Т. 575. – С. 202-233.
2. Давлетбаев А.Я., Мухаметова З.Х. Фильтрация газа в низкопроницаемом коллекторе с трещиной гидроразрыва пласта // Прикладная механика и техническая физика. – 2019. – Т. 60. – № 1. – С. 41-53.

УДК 537.86.029

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ НЕФТИ

Мухарямов И.Г., Ковалева Л.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
dream8708@inbox.ru

Резервуарные парки являются ключевой и достаточно важной частью технологического оборудования нефтеперекачивающей станции, нефтебазы, нефтеперерабатывающего завода. Их основными функциями являются прием или сдача нефти, доведение нефти до необходимого качества и обеспечение учета. При хранении нефти, которая зачастую бывает осложненной высоким содержанием асфальтенов, смол и парафинов, в резервуарах происходит регулярное и неизбежное образование и накопление донных отложений.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния сверхвысокочастотной и высокочастотной электромагнитных методов воздействия на процессы образования донных отложений в резервуарных парках. А основными задачами определения влияния высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитных (ЭМ) воздействий на интенсивность образования донных отложений.

Объектами исследования стали несколько сортов нефтей с различных месторождений и с различным содержанием асфальтенов, смол и парафинов в своем составе. Основным методом исследования – экспериментальное воздействие, моделирование процессов хранения и наблюдение за нефтями.

Выбранные нефти подвергались ВЧ и СВЧ ЭМ методами воздействия с последующим смешением с фиксированным объемом глиняной смеси, и фиксации изменений, происходящих в процессе осаждения взвеси и глино-парафиново-асфальтеновых отложений у обработанных и необработанной нефтей. Условия эксперимента были подобраны таким образом, чтобы соблюдалось гидродинамическое подобие.

В результате было выявлено, что СВЧ и в значительной степени ВЧ ЭМ воздействия, приводят к уменьшению количества донных отложений в резервуарах, и увеличению количества мобильной (откачиваемой) нефти, а значит могут найти широкое применение в практике трубопроводного транспорта и хранения нефти, в качестве превентивного метода борьбы с донными отложениями нефти.

УДК 537.86.029

## ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЕЙ

Мухарямова Г.И., Ковалева Л.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

gulshat-karimova-1993@mail.ru

Реологические свойства, такие как коэффициенты кинематической и динамической вязкостей и предел текучести нефтей, могут изменяться под влиянием различных факторов, например, температуры, давления, концентрации или присутствия других веществ. Реологические свойства являются основополагающей частью при подборе насосно-силового оборудования, расчете параметров работы нефтеперекачивающей станции и оборудования. В данной работе исследуются влияния высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитных (ЭМ) воздействий на реологические свойства тяжелых нефтей, перекачка которых осуществляется только в смеси или с разбавителями.

Основным методом исследования стало экспериментальное воздействие и математическое моделирование процессов. Основной задачей – определение влияния ЭМ полей на реологические свойства тяжелых нефтей, величины предельных напряжений сдвига.

В результате исследований выявлено уменьшение коэффициентов кинематической и динамической вязкости тяжелых нефтей после электромагнитной обработки, на величину порядка 50% при температурах нефти от 0 до 15 градусов [1]; уменьшение площади петли гистерезиса на графиках зависимости напряжений сдвига от скорости сдвига; ослабление тиксотропных свойств нефтей.

В связи с тем, что такие параметры как величина предельного напряжения сдвига и тиксотропность, являются ключевыми при пусках, остановках и в целом эксплуатации неизотермических нефтепроводов, представленные исследования и выводы имеют высокую степень актуальности для промышленной практики трубопроводного транспорта вязких нефтей.

### Литература

1. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Мухарьмова Г.И. Исследования влияния высокочастотного, сверхвысокочастотного электромагнитного и теплового видов воздействия на свойства Ярегской и Devonской нефтей // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7. № 4. С. 10-26.

УДК 532.5

### КОЛЕБАНИЯ РАСХОДА АНОМАЛЬНО ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ПЕРЕПАДЕ ДАВЛЕНИЯ

Мухутдинова А.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия

mukhutdinova23@ya.ru

Рассматривается течение аномально термовязкой несжимаемой жидкости в кольцевом канале под действием постоянного перепада давления  $\Delta p$ . В первой половине канала на его внутренних и внешних стенках действует граничное условие первого рода, во второй половине учитывается конвективный теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона-Рихмана (граничное условие третьего рода) (рис. 1).

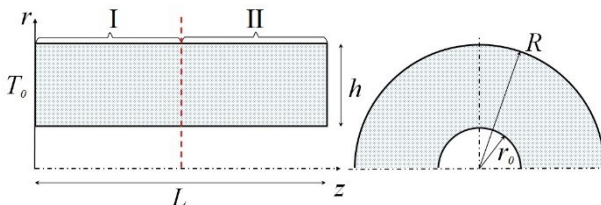


Рис. 1. Схема канала



Численное исследование направлено на анализ влияния формы зависимости вязкости от температуры и условий теплообмена на характеристики течения и расход жидкости. Математическая модель состоит из уравнений неразрывности, Навье-Стокса и сохранения энергии, записанных в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии [1] в безразмерном виде.

Рассмотрена аномальная зависимость вязкости от температуры, предполагающая её немонотонное изменение [2]. Характер изменения расхода аномально термовязкой жидкости в зависимости от условий теплообмена во второй половине канала представлен на рис. 2. Из рисунка видно, что при изменении числа Нуссельта возможны как незатухающие, так и затухающие колебания расхода. Это объясняется резким изменением теплообмена вдоль оси канала [3-4]. При этом во второй половине канала происходит охлаждение жидкости до температуры, соответствующей максимальной вязкости, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления и соответствующему уменьшению расхода. Поступающая в канал горячая жидкость успевает охладиться и происходит уменьшение высоковязкой области. При этом высоковязкая область разделяется на два вязких барьера в первой и второй половине, соответственно. Линейный размер вязкого барьера в первой половине канала уменьшается, а во второй половине - выходит за пределы канала. Затем процесс повторяется и возникает периодическое изменение расхода жидкости.

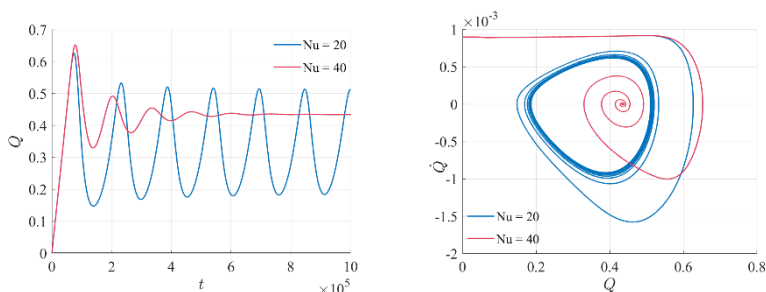


Рис. 2. Характер колебаний потока жидкости и фазовые портреты колебаний изменения расхода жидкости в зависимости от условий теплообмена

Фазовые портреты колебаний, представленные на рис. 2, описываются логарифмическими спиралями. Фазовые портреты затухающих колебаний сходятся к точке, называемой «устойчивый фокус», а незатухающие колебания образуют «предельный цикл».

Работа выполнена при поддержке средствами госбюджета по госзаданию 124030400064-2 (FMRS-2024-0001).

### **Литература**

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Часть 2 // М.: Физматлит. 1963. 728 с.
2. Урманчеев С.Ф., Киреев В.Н. Установившееся течение жидкости с температурной аномалией // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 396. – № 2. – С. 204-207.
3. Киреев В.Н., Мухутдинова А.А., Урманчеев С.Ф. О критических условиях теплообмена при течении жидкости с немонотонной зависимостью вязкости от температуры в кольцевом канале // Прикладная математика и механика. – 2023. – Т. 87. – № 3. – С. 369-378.
4. Киреев В.Н., Мухутдинова А.А., Урманчеев С.Ф., Режимы автоколебаний при течении аномально термовязкой жидкости // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. – Т. 514.

УДК 536

### **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ «ФРОНТ ПРОТАИВАНИЯ МЕРЗЛОГО ГРУНТА ПОД ДВУХСЛОЙНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ»**

Назмутдинов Ф.Ф.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

mmx\_@mail.ru

Мерзлые грунты занимает две трети площади нашей страны. Рыхлые грунты — песчаники, галечники и глины — при замерзании цементируются льдом и становятся очень крепкими. Они выдерживают большие нагрузки и служат надежным основанием для различных фундаментов. При температурах близких к  $0^{\circ}$ , мерзлые грунты становятся пластичными и не выдерживают тяжести сооружений.

Мерзлотные процессы также осложняют строительство и эксплуатацию зданий и дорог.

Для поддержания постоянной температуры грунта и минимизации негативных последствий применяют различные технологии теплоизоляции. Поэтому, актуальным является исследование распределения температуры в грунте с течением времени для оценки эффективности применяемых теплоизолирующих материалов.

Одним из эффективных методов теплоизоляции является использование нескольких слоев различных теплоизоляторов. Например, пеноплекса и торфа. Для расчетов фронта протаивая мерзлого грунта под

двумя слоями теплоизолирующего материала составлена программа на ЭВМ «Фронт протаивания мерзлого грунта под двухслойной теплоизоляцией».

Программа зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности за номером 2016612369 и внедрена в учебный процесс в качестве лабораторной работы по определению оптимальных параметров теплоизолирующих слоев.

### Литература

1. Хабибуллин И.Л., Нигаметьянова Г.А., Назмутдинов Ф.Ф. Теплоперенос и фазовые переходы воды в многослойных системах поверхности криолитозоны. Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 1. С. 105-112.
2. Хабибуллин И.Л., Хамитов А.Т., Назмутдинов Ф.Ф. Исследование динамики фазовых переходов в пористых средах, инициируемых нагревом электромагнитным излучением. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-5. С. 2556-2557.

УДК 551.547

### НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Назмутдинова Л.Р.<sup>1</sup>, Назмутдинов Ф.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

margo\_nlr@bk.ru

Рассматривается модельная задача, описывающая кинетику эндотермических реакций, стимулируемых нагревом электромагнитным излучением. В основу моделирования положены уравнения энергетического баланса и кинетики химических реакций. В результате численного моделирования показано влияние характеристик электромагнитного излучения на скорость протекания химических реакций

Скорость множества химических реакций существенно зависит от температуры. Ускорить или инициировать химическую реакцию можно воздействуя на реагенты сверхвысокочастотным или высокочастотным электромагнитным полем. В одномерном случае система уравнений, описывающих кинетику химических реакций, инициируемых электромагнитным нагревом, представляют собой уравнения теплопроводности и кинетики химических реакций. Изменение диэлектрических свойств при нагреве обуславливает зависимость диэлектрической проницаемости среды от координаты.

## Литература

1. Хабибуллин И.Л., Назмутдинов Ф.Ф., Габзалилов А.Ф. Моделирование кинетики химических реакций в СВЧ электромагнитном поле // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. 2008. Т. 6. С. 156-159.
2. Назмутдинов Ф.Ф., Хабибуллин И.Л., Вахитова Н.К. Моделирование фильтрации к скважине вскрытой трещиной ГРП // Вестник Башкирского университета. 2018. Т. 23. № 4. С. 953-957.

УДК 519.242.7, 534.26

### ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА РАССЕЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ НА МНОЖЕСТВЕ СФЕР

Насибуллаева Э.Ш.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия

elvira@anrb.ru

Предложена численная методика, основанная на методе ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП) [1], для исследования рассеяния акустической волны на множестве сфер с целью анализа чувствительности данной системы к малому изменению нескольких основных параметров.

Метод ОЦКП реализован для трехфакторного вычислительного эксперимента и простых типов конфигураций (однослойной и трехслойной) с равномерным распределением частиц одинакового радиуса, разного числа сфер и трех основных факторов. Для полученного уравнения регрессии проведены проверки адекватности модели по  $F$ -критерию Фишера и значимости коэффициентов по  $t$ -критерию Стьюдента, а также поиск максимального и минимальных значений целевой функции  $Y$  – нормированного давления в точке  $M_c$  (см. Рис. 1(а)). Диаграммы распределения давления при максимальном значении  $Y$  в случае звуконепроницаемых сфер представлены на Рис. 1(б, в).

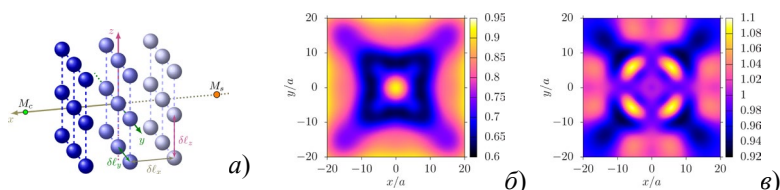


Рис. 1. Конфигурация системы а); диаграммы распределения нормированного давления в плоскостях, параллельных  $Oyz$  и содержащих точку  $M_c$  б); монопольный источник излучения  $M_s$  в)

Проведенные вычислительные эксперименты показали правомерность и целесообразность применения метода ОЦКП к подобного рода задачам.

Работа выполнена при поддержке средствами госбюджета по госзаданию 124030400064-2 (FMRS-2024-0001).

### **Литература**

1. Oyejola B.A., Nwanya J.C. Selecting the Right Central Composite Design // International Journal of Statistics and Applications, 2015. V. 5, No. 1. P. 21-30.

УДК 532

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ С УЧЕТОМ ТЕПЛООБМЕНА**

Низамова А.Д.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

adeshka@yandex.ru

Использование микроканалов распространяется на охлаждение электроники, управление температурными режимами в аэрокосмической отрасли, а также на биологические и химические исследования [1].

Ключевым фактором в создании эффективных микротеплообменников является оптимальная геометрия внутренней структуры микроканалов. В данной работе исследуется влияние изменения конфигурации микроканалов на тепломассоперенос.

Ранее аналогичные исследования проводились с использованием метода граничных элементов [2], но без учета теплообмена.

В данной работе проведено исследование течения жидкости в микроканале с препятствиями, учитывающее теплообмен. Построены графики зависимости максимальной температуры от пустотности микроканала и перепада давления. Изучены распределения скоростей и температурные поля.

Исследование показало, что трехмерное моделирование и учет реальных характеристик рабочей жидкости и материала микроканала позволяют определить оптимальные условия теплообмена. Выявленные особенности влияния конфигурации микроканала могут быть использованы при конструировании микротеплообменников.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24- 19-00697 <https://rscf.ru/project/24-19-00697>.

### Литература

1. Фадеев С.И., Косцов Э.Г., Пиманов Д.О. Численное исследование математических моделей микроэлектромеханических резонаторов разного типа // Сиб. журн. индустр. Математики. 2014. Т. 14. № 4. С. 120-135.
2. Солнышкина О.А., Батыршин Э.С., Питюк Ю.А. Исследование гидродинамических потоков в микромоделях сред с двойной пористостью // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2021. № 4. С. 9-18.

УДК 532

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

Низамова А.Д.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия  
adeshka@yandex.ru

Критическое число Рейнольдса, определяющее переход ламинарного течения в турбулентное, было установлено Рейнольдсом и позже уточнено Орром и Зоммерфельдом [1, 2]. Однако классическая теория не учитывает зависимость вязкости от температуры, что важно для реальных условий. Исследование гидродинамической устойчивости термовязкой жидкости в каналах с неоднородным температурным полем сводится к обобщённому уравнению Орра-Зоммерфельда [3]. Численно спектральным методом разложения по полиномам Чебышева построены зависимости критического числа Рейнольдса от параметра термовязкости, которые позволяют оптимизировать свойства жидкости и геометрию канала при проектировании теплообменников.

Экспериментальная установка с кольцевым каналом позволила изучить переход ламинарного течения в турбулентное для раствора пропиленгликоля. Результаты показали, что критическое число Рейнольдса зависит от распределения вязкости по сечению канала, связанного с разностью температур на стенках. Эксперименты подтвердили влияние неоднородного распределения вязкости на уменьшение критического числа Рейнольдса.

Работа выполнена при поддержке средствами госбюджета по госзаданию 124030400064-2 (FMRS-2024-0001).

### Литература

1. Orr W.M.F. The stability or instability of the steady motions of a liquid. Part I. Proceedings of the Royal Irish Academy. 1907. V 27. Pp. 9-68.

2. Sommerfeld A. Ein Beitrag zur hydrodynamische Erklärung der turbulenten Flüssigkeitsbewegungen // Proceedings of the 4th International Congress of Mathematicians III. Rome. 1908. Pp. 116-124.
3. Nizamova A. D. et al. Features of laminar-turbulent transition for the coolant flow in a plane heat-exchanger channel // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2021. – Т. 42. – С. 2211-2215.

УДК 533

## ВЛОЖЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ ПОДМОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫБРАННОГО ПОДГРАФА ПОДАЛГЕБР, ДОПУСКАЕМЫХ УРАВНЕНИЯМИ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

Никонорова Р.Ф.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия  
renatanikon@gmail.com

Система уравнений газовой динамики с общим уравнением состояния допускает 11-параметрическую группу преобразований. В случае уравнения состояния одноатомного газа группа расширяется еще 3 преобразованиями, в том числе специфичным проективным преобразованием. Оптимальная система подалгебр соответствующей 14-мерной алгебры Ли представлена в работе [1]. Она включает 1826 подалгебр различных размерностей.

Рассматривается выбранный подграф подалгебр размерностей 1-5 (Рис. 1, вместо операторов указаны только их номера).

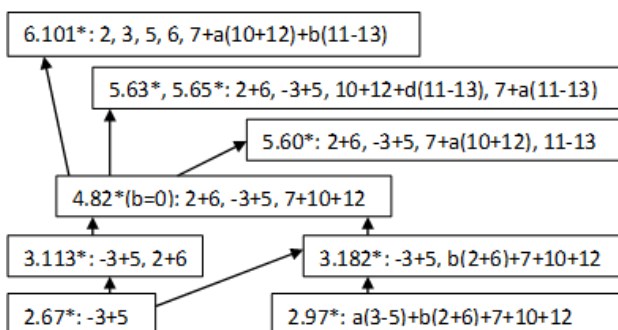


Рис. 1

Для каждой подалгебры подграфа специальным образом выбраны инварианты базисных операторов (согласованные инварианты), построена инвариантная подмодель и показано вложение подмоделей [2].

## Литература

1. Черевко А.А. Оптимальная система подалгебр для алгебры Ли операторов, допускаемых системой уравнений газовой динамики с уравнением состояния  $p=f(S)\rho^{5/3}$ . Новосибирск, 1996. Препринт, Ин-т гидродинамики; №4-96. 39 с.
2. Хабилов С.В. Иерархия подмоделей дифференциальных уравнений // Сибирский математический журнал. 2013. Т. 54, № 6. С. 1396-1406.

УДК 532.546

### ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРУБКАХ ТОКА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ

Поташев К.А.<sup>1</sup>, Баушин В.В.<sup>2</sup>, Салимьянова Д.Р.<sup>1,3</sup>, Ураимов А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт математики и механики К(П)ФУ им. Н.И.Лобачевского,  
Казань, Россия

<sup>2</sup>ООО «ИМПЕЛ СОФТ», Казань, Россия

<sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

KPotashev@mail.ru

Продemonстрировано применение модели фильтрации в фиксированных трубках тока для проектирования геолого-технических мероприятий в нефтяном пласте [1,2]. Модель состоит в разложении трехмерной фильтрационной задачи на набор задач пониженной размерности в трубках тока. Это позволяет на порядки сократить машинное время численного решения и использовать расчетные сетки высокого разрешения. Двумерные трубки тока детально воспроизводят вертикальную геологическую неоднородность пласта и мелкомасштабные гидродинамические эффекты. Распределение ширины вертикальных сечений вдоль трубок тока полагается фиксированным в период воздействия. Последнее позволяет исключить ресурсоемкий процесс перестроения трубок тока с переносом расчетных полей давления и насыщенности на трехмерную сетку и обратно. Гидродинамическая изолированность трубок тока делает независимым решение в них фильтрационных задач, что позволяет применять аппарат параллельных вычислений, при этом вычислительная сложность растет линейно по числу трубок тока.

## Литература

1. Мазо А. Б. и др. Расчет полимерного заводнения нефтяного пласта по модели фильтрации с фиксированной трубкой тока // Георесурсы. – 2017. – Т. 1. – № 19. – С. 15-20.



2. Potashev K. et al. High-speed algorithm for computing the inflow to multiple-fractured horizontal wells using stream tubes //Computational Geosciences. – 2024. – Т. 28. – № 6. – С. 1389-1411.
3. Салимьянова Д. Р., Поташев К. А., Баушин В. В. Целесообразность удаленного размещения от нагнетательной скважины водоизолирующего состава в высокопроницаемом слое // Георесурсы. – 2025. – Т. 27. – № 1. – С. 261-266.

УДК 532

## ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

Рамазанов А.Ш., Исламов Д.Ф., Давлетшин Ф.Ф., Акчурин Р.З.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

RamazanovASh@uust.ru

Цель работы – контроль за состоянием прискважинной зоны пласта (ПЗП). Загрязнение этой зоны приводит к снижению продуктивности/приемистости скважин. Для оценки состояния ПЗП используют гидродинамические исследования (ГДИ). Однако при этом определяют скин-фактор пласта, который зависит не только от состояния прискважинной зоны, а от многих факторов. Даже если связать найденный по ГДИ скин-фактор только с состоянием ПЗП, невозможно определить по нему по отдельности радиус зоны загрязнения пласта и ее проницаемость.

Этот недостаток удастся преодолеть при использовании данных о нестационарной температуре притекающей из пластов жидкости для переходных процессов после пуска, остановки или изменения режима работы скважины. Изменение температуры флюида за счет баротермического эффекта зависит от проницаемости зондируемого в данный момент участка пласта. Радиус исследования определяется удельным дебитом. Эти возможности термического зондирования пласта были впервые показаны Чекалюком Э.Б. еще в 60-е годы прошлого века [1] и активно развиваются в последние годы в связи с использованием симуляторов и появлением новых способов измерения температуры в скважине [2,3].

В докладе обсуждаются результаты исследования новых аналитических и численных моделей неизотермической двухфазной фильтрации в пласте с радиальной неоднородностью и обоснование алгоритмов определения параметров неоднородности в пласте по нестационарной температуре в скважине.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00803, <https://project/25-29-00803>.

## Литература

1. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. – М.: Недра, 1965. – 238 с.
2. Рамазанов А.Ш. Теоретические основы скважинной термометрии: Учебное пособие. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2017. – 114 с.
3. Валиуллин Р.А. и др. Опыт использования симуляторов при интерпретации термических и термогидродинамических исследований // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2022. – Т. 7. – № 1. – С. 99-109.

УДК 532.5

### ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЭРИТРОЦИТОВ ЦЕЛЬНОЙ И РАЗБАВЛЕННОЙ КРОВИ В МИКРОКАНАЛАХ СО СТЕНОЗОМ

Рахимов А.А., Валиев А.А., Ахметов А.Т.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия  
ragar83@mail.ru

Цель исследования – выявить различия в скоростях и ориентации эритроцитов при течении цельной и разбавленной крови (1% эритроцитов) в микроканале со стенозом разной ширины. Задачи: разработка и изготовление микрожидкостных устройств (МЖУ) для моделирования течения в сосудах со стенозом; проведение экспериментов для анализа особенностей течения.

Объект исследования: цельная и разбавленная кровь, скорость и структура течения эритроцитов в микроканале с сужением. МЖУ (глубина 50 мкм, длина 10 мм, ширина 1 мм) содержат посередине сужения длиной 100 мкм и шириной 50, 100 и 200 мкм, изготовлены методом мягкой фотолитографии аналогично [1]. Для калибровки использовали видеосъемку и расход воды. Эксперименты: течение крови с антикоагулянтom ЭДТА-К3 в МЖУ при  $\Delta P=500$  Па, съемка через микроскоп BDS500 камерой Chronos 1.4 (1500 кадр/с).

При 1% концентрации эритроциты на входе (перед сужением) ориентированы преимущественно вертикально, на выходе – горизонтально. Параболическое распределение скоростей вызывает их вращение и оседание в нижней части канала. Эритроциты плотнее несущей фазы, они ускоряются перед входом в сужение и в нём. Перед сужением скорость эритроцитов ниже скорости несущей фазы, после – выше. Для цельной крови эритроциты перед стенозом и в нём ориентируются также вдоль линий тока, а после стеноза перестраиваются перпендикулярно линиям тока и параллельно друг другу. При сужении  $50 \times 100$  мкм на расстоянии вплоть до 300 мкм скорость перед сужением выше, чем после, далее выравнивается; при  $100 \times 100$  мкм – обратная картина (на 100 мкм после сужения скорость выше); при  $200 \times 100$  мкм

скорости до и после сужения примерно равны из-за меньшего влияния ускорения.

После стеноза эритроциты ориентируются перпендикулярно линиям тока, что увеличивает вязкость и повышает риск тромбоза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00403, <https://rscf.ru/project/24-21-00403/>.

### **Литература**

1. Ахметов А. Т. и др. Анизотропные свойства крови в сосуде со стенозом // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российская академия наук», 2018. – Т. 483. – № 2. – С. 143-147.

УДК 544.344

### **PVT-МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СОАВЕ-РЕДЛИХА-КВОНГА С ПОПРАВКОЙ ПЕНЕЛЁ**

Ремизов А.Л., Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,  
Россия

[Elena.f.moiseeva@yandex.ru](mailto:Elena.f.moiseeva@yandex.ru)

Для точного описания динамики газоконденсатных смесей в условиях широкого диапазона давлений и температур требуется максимально точная информация о фазовом состоянии и теплофизических свойствах чистых компонентов и смесей.

В работе приведены различные аспекты моделирования фазового равновесия и термодинамических свойств чистых углеводородов и смесей.

Представлены результаты разработки программных модулей для расчета фазового равновесия и термодинамических свойств газоконденсатных смесей на основе уравнения состояния Соаве-Редлиха-Квонга с поправкой Пенелё в диапазонах давлений и температур, соответствующих всем этапам добычи углеводородов [1, 2]. Реализованы алгоритмы для моделирования лабораторных экспериментов по определению фазового поведения углеводородных флюидов. Проведено сравнение результатов моделирования с программными продуктами, наиболее часто используемыми в мировой практике.

Кроме того, предложена новая корреляция для расчета теплоемкости, энтальпии и энтропии чистых углеводородов и углеводородных фракций в идеально-газовом состоянии. Проведено сравнение с экспериментальными данными. Показано, что предложенная модель

позволяет повысить точность расчета указанных термодинамических свойств в сравнении с другими известными методами.

### **Литература**

1. Soave G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state // Chemical engineering science. – 1972. – Т. 27. – № 6. – С. 1197-1203.
2. Malyshev V. L., Nurgalieva Y. F., Moiseeva E. F. Comparative study of empirical correlations and equations of state effectiveness for compressibility factor of natural gas determination // Periodico Tche Quimica. – 2021. – Т. 18. – № 38.

УДК 544.344

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ PVT-ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАСТОВЫХ ФЛЮИДОВ**

Ремизов А.Л., Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,  
Россия  
mail-ral@yandex.ru

В настоящее время большое распространение получили методы повышения нефте- и конденсатоотдачи пласта, связанные с закачкой газообразных или жидких агентов в нефтяные и нефтегазоконденсатные пласты [1]. Для исследования смесимости пластового флюида с закачиваемым объектом в лабораторных условиях применяют такие методы специальных PVT-анализов, как эксперимент по набуханию (swelling test), многократной смесимости, тонкой трубки (slim tube test), всплывающего пузырька.

Целью данной работы является разработка программных модулей для моделирования теста на набухание, а также лабораторного эксперимента тонкой трубки.

Для моделирования указанных выше специальных PVT-анализов разработан программный код на языке программирования Python, основанный на уравнении состояния Соаве-Редлиха-Квонга с поправкой Пенелё для расчета фазового равновесия углеводородной смеси на каждом этапе эксперимента [2].

Произведено сравнение результатов расчетов с использованием разработанного программного модуля с известными программными комплексами для моделирования термодинамических свойств флюидов, такими как PVTsim Nova от Calsep и Дизайнер PVT от ТНавигатор. Показано, что отклонение результатов не превышает 2% в диапазоне температур от 200 до 400 К и давлений от 0,1 до 600 атм.

## Литература

1. Лобанов А.А., Федоровский С.А., Промлезев И.О. и др. Новый алгоритм расчета и экспертизы результатов ССЕ-теста нефтей типа «Black oil». Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 10. – С. 43-54.
2. Malyshev V.L., Nurgalieva Y.F., Moiseeva E.F. Comparative study of empirical correlations and equations of state effectiveness for compressibility factor of natural gas determination // Periodico Tche Quimica. – 2021. – Т. 18. – № 38.

УДК 532.5

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Сабиров Т.З., Зиннатуллин Р.Р.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
tsabirov213@gmail.com

Цель исследования: рассмотрение наиболее эффективного типа физического поля и определение оптимальных параметров его воздействия для разделения трехфазных эмульсий (масло, вода, механические примеси) с заданными характеристиками.

В данной работе был рассмотрен способ разрушения модельных трехфазных эмульсий с помощью воздействия ЭМ поля для отслоения воды из эмульсии.

Экспериментальная часть включает приготовление модельных эмульсий разной концентрации, воздействие на них электромагнитным полем различной конфигурации и анализ полученных результатов.

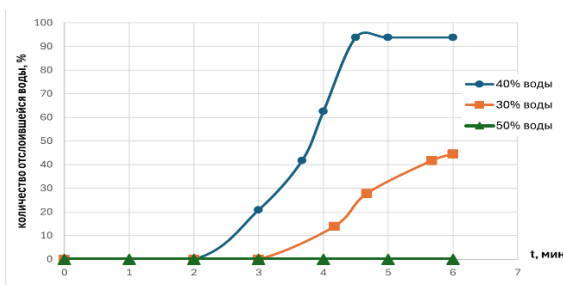


Рис. 1. Зависимость количества выделившейся воды определенной концентрации от времени действия ЭМ поля.

Анализ полученных результатов показал, что после воздействия ЭМ поля твердые частицы выпали в осадок и отслоилась вода. Эксперимент

показал, что количество выделившейся воды зависит от концентрации. Исходя из полученных данных были построены графики зависимости количества выделившейся воды определенной концентрации от времени действия ЭМ поля.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00181.

### Литература

1. Позднышев Г.Н. Стабилизация и разрушение нефтяных эмульсий. М.: Недра, 1982. 221 с.

УДК 532.5

### ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ДВУМЕРНЫХ ТРУБКАХ ТОКА

Салимьянова Д.Р.<sup>1,2</sup>, Поташев К.А.<sup>2</sup>, Малбаева А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского К(П)ФУ,  
Казань, Россия

Dilara.Salimyanova@gmail.com

Цель работы заключается в исследовании точности и оценке вычислительной эффективности метода декомпозиции трехмерной модели фильтрации на набор двумерных задач в вертикальных сечениях фиксированных трубок тока, проходящих между парами взаимодействующих источников и стоков [1].

На примере задачи изоляции высокопроницаемого слоя [2] выполнена оценка сходимости численного решения в коммерческих симуляторах, реализующих традиционный метод трехмерного моделирования, а также оценка сходимости численного решения модели фильтрации в трубках тока. В качестве трехмерного симулятора для сравнения скорости моделирования и сопоставления уровня точности использован ROXAR Tempest.

Продемонстрировано, что увеличение числа трубок тока  $N_T$  приводит к линейному росту машинного время. Применение модели трубок тока в 2–3 раза сокращает время счета по сравнению с трехмерным симулятором при погрешности на уровне 4 %. Параллельный режим решения задач в независимых трубках тока дополнительно кратно ускоряет вычисления.

Получены оценки повышения эффективности расчетной схемы модели трубок тока за счет применения низкодиссипативных схем решения уравнения переноса насыщенности.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

### **Литература**

1. Поташев К. А. и др. Анализ и проектирование разработки участка нефтяного пласта с использованием модели фиксированной трубы тока // Нефть. Газ. Новации. – 2016. – № 4. – С. 18-26.
2. Салимьянова Д. Р., Поташев К. А., Баушин В. В. Целесообразность удаленного размещения от нагнетательной скважины водоизолирующего состава в высокопроницаемом слое // Георесурсы. – 2025. – Т. 27. – № 1. – С. 261-266.

УДК 538.91

### **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ**

Самигуллина А.И., Шарафуллин И.Ф.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

angelasamig2002@gmail.com

Спин-волновые устройства, основанные на магнитных тонких пленках, характеризуются дисперсией спиновых волн, зависящей от свойств материала волновода. Выбор магнитного материала критически важен для характеристик устройства. Использование магнитных гетероструктур открывает новые возможности для управления спиновыми волнами благодаря интерфейсным эффектам, позволяя улучшить контроль и взаимодействие волн, что повышает эффективность устройств.

В данной работе исследуется бислой, состоящий из магнитной и сегнетоэлектрической пленок, симметрия которых является простая кубическая решетка. Для расчета энергетического спектра и магнитных свойств используется метод двухвременных функций Грина. Также рассматриваются и магнитные характеристики модели.

В магнитной пленке поведение спиновых волн существенно зависит от температуры. При низких температурах сильные межспиновые взаимодействия приводят к локализации спиновых волн, проявляющейся в значительном затухании. Это ограничивает их распространение и приводит к неравномерному распределению энергии. По мере увеличения температуры тепловая энергия становится сопоставимой с энергией межспиновых взаимодействий, постепенно преодолевая их влияние. В результате затухание спиновых волн уменьшается, а их распространение становится более однородным по всей поверхности пленки. Ближе к критической температуре спиновые волны

демонстрируют коллективное поведение, распространяясь практически без затухания, что характеризуется когерентностью и дальним порядком. Превышение критической температуры приводит к фазовому переходу и упорядоченное состояние разрушается.

Работа выполнена в рамках государственного задания соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 тема № 324-21.

### **Литература**

1. Sharafullin I. F. et al. Effects of the Interlayer Interactions in Frustrated Magnetoelectric Thin Films //Physics of Metals and Metallography. – 2024. – Т. 125. – № 14. – С. 1894-1900.

УДК 532.5; 519.6

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛАХ С НЕРОВНЫМИ СТЕНКАМИ**

Сафина И.Ф., Солнышкина О.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

safinaindira6@gmail.com

Изучение течений жидкостей в микроканалах с неровными стенками приобретает актуальность в связи с развитием микро- и нанотехнологий. Геометрия стенок изменяет гидродинамические характеристики течения. Такие каналы используются в микроаналитических системах, биомедицинской инженерии, микротеплообменниках. Экспериментальные и численные методы позволяют детально исследовать сложные режимы течения, расширяя возможности практического использования микроканалов

В работе рассматриваются методы экспериментального и численного анализа. Была проведена серия экспериментов по исследованию течения жидкости в микроканалах с прямоугольным поперечным сечением (высота – 25 мкм, ширина – 100 мкм) с боковыми кавернами в виде квадратов со сторонами 50 мкм. Более подробно детали эксперимента и установки описаны в работах [1, 2].

В данной работе численный анализ проводился с использованием программного комплекса ANSYS. Была выполнена триангуляция всех микроканалов с созданием сетки. Для различных объемных расходов были получены картины течения жидкостей в боковых кавернах, а также рассмотрено влияние изменения относительного расположения боковых каверн на пропускную способность микроканала.



Результаты работы подтверждают, что шероховатости стенок микроканалов позволяет целенаправленно изменить гидродинамические характеристики потоков, что открывает новые возможности для создания энергоэффективных микроустройств в биомедицине и микроэлектронике.

### Литература

1. Батыршин Э.С., Солнышкина О.А., Питюк Ю.А. Изучение особенностей пропитки сред с двумя масштабами пористости // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – № 4. – С. 553-557.
2. Zamula Y.S. et al. Experimental study of the multiphase flow in a pore doublet model // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1421. – № 1. – С. 012052.

УДК 532.542

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ С УЧЕТОМ СЕДИМЕНТАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

Сахибгареев Э.Э., Мусин А.А., Ковалева Л.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

dfdslotus@gmail.com

В работе представлена физико-математическая модель динамики оседания дисперсной фазы в движущейся жидкости в условиях теплового нагрева снизу.

Рассматривается процесс осаждения твердых сферических частиц и капель воды в углеводородной жидкости. В зависимости от выбора дисперсной фазы скорость седиментации  $\vec{U}_{sed}$  может быть посчитана по формуле Стокса (частицы) (1) или по формуле Адамара-Рыбчинского (капли) (2) [1]:

$$\vec{U}_{sed} = \frac{2}{9} r_0^2 \vec{g} \frac{(\rho_D - \rho_F)}{\mu_F} f(C) \quad \#(1)$$

$$\vec{U}_{sed} = \frac{2}{3} r_0^2 \vec{g} \frac{(\rho_D - \rho_F)}{\mu_F} \frac{(\mu_F + \mu_D)}{(2\mu_F + 3\mu_D)} f(C) \quad \#(2)$$

где  $r_0$ ,  $g$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $f(C)$ ,  $D$ ,  $F$  – радиус капли/частицы, ускорение свободного падения, плотность, вязкость, функция стесненного осаждения, индексы среды и фазы соответственно. Математическая модель тепловой конвекции в дисперсной системе записана в приближении Буссинеска с учетом гравитационного осаждения дисперсной фазы [2].

Проведены исследования гравитационного осаждения дисперсной фазы для разных начальных концентраций и при различных радиусах. Принято, что плотности капель и частиц совпадают. Показано, что

профиль течения и динамика осаждения капель и частиц различны. Это различие более ярко выражено при увеличении размера дисперсной фазы, а в случае моделирования динамики эмульсии также зависит от соотношения вязкостей дисперсной фазы и дисперсионной среды.

### Литература

1. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: ГИФМЛ, 1959. 700 с.
2. Юлмухаметова Р.Р., Тухбатова Э.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Исследование влияния тепловой конвекции на процесс расслоения водонефтяной эмульсии // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2017. Т. 12, № 2. С. 163-168.

УДК 532

### ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ В НЕФТЕМАТЕРИНСКОЙ ПОРОДЕ В УСЛОВИЯХ ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Смирнов А.В.<sup>1</sup>, Попов Е.Ю.<sup>1</sup>, Мухина Е.Д.<sup>1</sup>, Спасенных М.Ю.<sup>1</sup>

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

A.Smirnov2@skoltech.ru

Интерес к освоению месторождений сланцевых углеводородов увеличивается в связи с сокращением традиционных запасов нефти. В РФ ведутся активные работы, направленные на разработку технологий разведки и добычи месторождений Баженовской свиты (БС), являющейся одной из крупнейших нефтегазоматеринских формаций мира [А. Э. Конторович и др., 2014]. Помимо запасов легкой подвижной нефти породы БС содержат большое количество твердого органического вещества - керогена. При повышенных температурах происходит термическая конверсия керогена с образованием мобильных углеводородов. Механизмы, продукты и кинетика данного процесса активно исследуются с целью разработки тепловых методов увеличения нефтеотдачи (МУН) БС и других нефтегазоматеринских пород [М. Спасенных и др., 2021, 2024]. Предполагается, что процесс теплового воздействия путем закачки теплоносителя с температурой 300–380 °С может обеспечить генерацию мобильных углеводородов за счет преобразования керогена, улучшить фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) породы [Т. Карамов и др., 2022] и, соответственно, привести к увеличению объёмов добычи нефти.

При оптимизации термических МУН экспериментально определяются параметры процессов, протекающих при тепловом

воздействии на пласт, которые используются как входные данные при построении модели разработки. Ключевой задачей является изучение влияния условий процессов (температура, давление) на преобразование керогена и породы в целом. Как правило, в лабораторных экспериментах моделируется влияние температуры и порового давления [М. Субботина и др., 2023]. Влияние литостатического давления не рассматривается из-за технических сложностей проведения эксперимента при температурах выше 200 °С. Вместе с тем, литостатическое давление может оказывать существенное влияние на преобразование пород, включая кинетику преобразования керогена, миграцию мобильных УВ, структуру пустотного пространства породы, вызывая компакцию вторичной органической пористости и нативные трещины в минеральной матрице. Отсутствие достоверных зависимостей ФЕС от температуры и литостатического давления снижает достоверность моделирования разработки месторождений сланцевой нефти с помощью термических МУН при оценке эффективности метода.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование изменений ФЕС нефтематеринской породы в пластовых условиях, реализующихся при применении тепловых МУН (закачка горячей воды) с учетом литостатического давления. Эксперимент проводился на образце баженовской свиты при температуре 360 °С, давлении флюида 23 МПа, литостатическом давлении 33 МПа при фильтрации горячей воды и непрерывном контроле проницаемости.

Для проведения эксперимента по изучению зависимости ФЕС(Т) был выбран цилиндрический керн, выбуренный из породы БС месторождения Салымского ЛУ. Общее содержание органического углерода (ТОС) составляет 15,68%, значение параметра  $S_2 = 84,58$  мг УВ/г породы, катагенетическая зрелость - МК1-2 (первая половина нефтяного окна) (таблица 2).

В основу методической части эксперимента положен ОСТ 39-235-89 по определению фазовых проницаемостей по жидкости на цилиндрических образцах керна. Образец помещался в герметичный тонкостенный реактор внутри автоклава, где создавали литостатическое и поровое давление. После достижения рабочих значений по давлению байпас перекрывался, автоклав нагревали до заданной температуры и поддерживали постоянные параметры с непрерывной прокачкой воды через образец. В ходе эксперимента измеряли перепад давления для расчёта проницаемости по закону Дарси.

Для передачи литостатического давления на образец в эксперименте применялся специально разработанный тонкостенный высокотемпературный реактор (толщина стенки 0,2 мм) из нержавеющей стали марки 12X18H10T, способный герметично обжать образец и

обладающий устойчивостью к химически агрессивным средам при высоких температурах (см. Рис. 1).

В ходе эксперимента температура ступенчато изменялась (25°C, 98°C, 300°C, 360°C, 98°C). На каждом этапе определялась проницаемость по воде при трёх скоростях фильтрации с достижением стабильного перепада.



Рис. 1. 3D модель высокотемпературного реактора

Для выявления изменений в составе ОВ и структуры породы до и после эксперимента проводились исследования при помощи: пиролиза по методу Rock-Eval (HAWK Resource Workstation), рентгеновской микротомографии (GE vltomeIx L240/180) и сканирующей электронной микроскопии (QuattroS Thermo Fisher Scientific).

В ходе эксперимента при повышении температуры с 25 до 300 °C наблюдалось устойчивое снижение проницаемости образца (см. рис. 2), что может быть связано с тепловым расширением керогена, а также набуханием глинистых минералов.

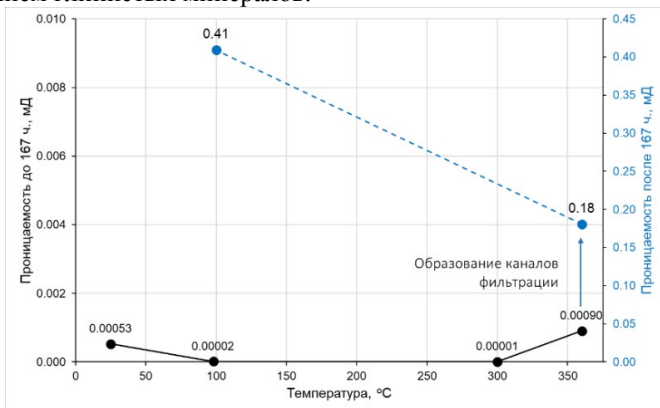


Рис. 2. Изменение проницаемости образца при температурах от 25 до 360°C

Температурный коэффициент объёмного расширения (ТКОР) минеральной матрицы составляет  $3 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , тогда как для керогена он равен  $90 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , что в 30 раз выше. Более термическое расширение керогена по сравнению с минеральной матрицей приводит к уменьшению пористости и проницаемости. Величина данного эффекта зависит от ТОС и температуры.

Минеральный состав образца приведён в таблице 1. Содержание глинистых минералов низкое (0.6%). Глины представлены иллитом - минералом, структурно близким к монтмориллониту, но с преобладанием замещения кремния алюминием в тетраэдрическом слое, что создаёт отрицательный заряд. Он компенсируется калием, который занимает пустоты кислородной решётки и обеспечивает прочную связь между слоями. Благодаря этому иллит имеет слабо набухающую структуру с гидратацией менее 1%.

Таблица 1 – Минеральный состав

№	Кварц, %	Пирит, %	ППШ, %	Доломит, %	Кальцит, %	Иллит, %	Каолинит, %	Сумма, %
1	93,3	3,5	2,5	0	0	0,6	0	100

С учетом малого влияния набухания глин основным фактором снижения проницаемости при нагреве образца БС является термическое расширение керогена.

После подъёма температуры с 300 °С до 360 °С и выдержке в течение 20 часов зафиксирован резкий скачок проницаемости с 0,9 мкД до 181 мкД. К этому моменту через образец было прокачено 70 поровых объемов. Такое значительное увеличение проницаемости может быть связано с формированием вторичной органической и минеральной пористости при преобразовании керогена и с формированием микротрещин.

Результаты томографии показали, что до термического воздействия образец имеет чётко выраженную слоистую структуру, типичную для пород БС, трещины отсутствуют.

В ходе эксперимента по всему объёму образца сформировалась сеть микротрещин с общим углом наклона около 30 градусов относительно направления напластования (см. Рис. 3). Характер их распространения соответствует деформациям сдвига, типичным для образцов с высокой анизотропией механических свойств. Диаметр образца уменьшился на

0,64 мм (2,2%) в направлении, перпендикулярном напластованию, а пористость увеличилась с 1,38% до 6,48%.

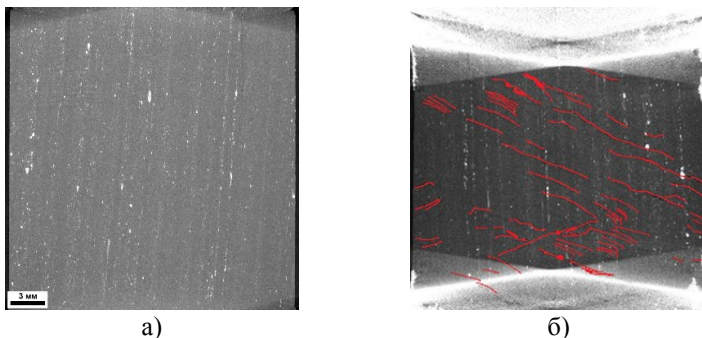


Рис. 3. Томография образца до (а) и после (б) эксперимента (красным выделены изменения порового пространства)

По результатам СЭМ можно сделать вывод, что в процессе термического воздействия наблюдаются значительные изменения в структуре керогена и минеральной матрице: зерна керогена уменьшились в объеме, приобрели дендритоподобную структуру и неправильную форму (см. Рис. 4). В органическом веществе появились поры и трещины, а также образовалась слоистая структура, что является следствием пустотного пространства, заполненного органическим веществом. В некоторых порах кероген полностью отсутствовал, что привело к деградации породы и образованию микротрещин в минеральной матрице.

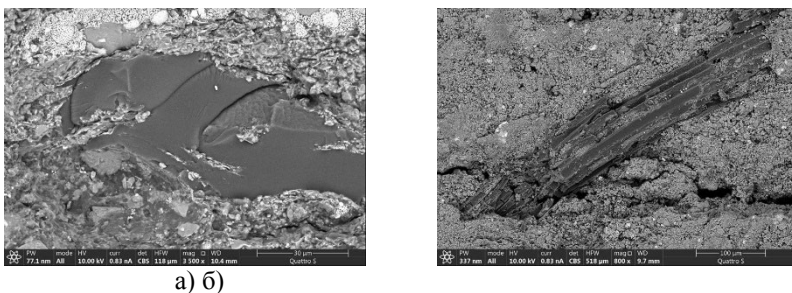


Рис. 4. Снимки СЭМ образца до (а) и после (б) эксперимента

Обнаруженные изменения позволяют сделать вывод о достижении высокой степени конверсии керогена и переходе части твердого ОВ в жидкую и газообразную фазу. В результате этого происходит деградация механических свойств системы «минеральная матрица — кероген», что

ведет к разрушению образца и формированию разветвлённой сети трещин. Одновременно под воздействием литостатического давления наблюдается компакция вторичной органической и минеральной пористости. Эти процессы вызывают эволюцию пустотного пространства и существенные изменения фильтрационно-емкостных свойств породы, способствуя образованию высокопроницаемой зоны дренирования и активной миграции мобильных углеводородов.

Результаты пиролиза образца до и после эксперимента демонстрируют, что в ходе эксперимента степень конверсии по пику S2 составила 91%, а все мобильные углеводороды (S0+S1) мигрировали из образца. Органическое вещество, наблюдаемое на снимках СЭМ, представляет из себя непиролизуемый остаток, о чём свидетельствует уменьшение KГОС с 0,56 до 0,12 ед. (Таблица 2).

Таблица 2 – Пиролитические параметры до и после эксперимента

	S0+S1, мг УВ/г породы	S2, мг УВ/г породы	ТОС, %	T <sub>макс</sub> , °C	KГОС, ед.	Степень конверсии, %
до	13,25	84,58	15,68	435	0,56	91
после	0,68	7,77	6,55	444	0,12	

Для определения зависимости проницаемости породы от температуры было выделено два температурных режима:

- 25°C < T < 300°C – в этом диапазоне основное влияние на ФЕС оказывает термическое расширение органического вещества, что приводит к ухудшению коллекторских характеристик (Рис. 5);
- T > 300°C – в этом диапазоне основное влияние на ФЕС оказывает процесс конверсии керогена, который вызывает формирование вторичной органической пористости, изменение механических свойств породы, частичную компакцию пустотного пространства, а также генерацию микро- и макротрещин, что приводит к улучшению коллекторских свойств (см. Рис. 6).

Обработка экспериментальных данных и их аппроксимация выполнена в программе OriginPro (см. Рис. 5). Полученная температурная зависимость (25°C < T < 300°C) имеет вид:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{пр}}^{25} \cdot \Delta k \quad (1)$$

при P<sub>пор</sub>=20 МПа, P<sub>лит</sub>=34,4 МПа

Коэффициент детерминации составил R<sup>2</sup> = 0,98 (см. рисунок 4).

$$\Delta k = 2,05013 \cdot e^{\frac{-T}{26,55556}} + 0,15869 \quad (2)$$

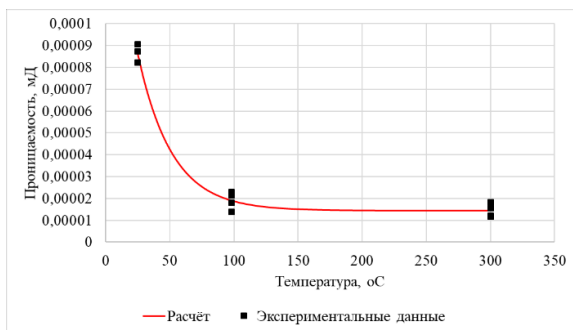


Рис. 5. Изменение проницаемости образца в диапазоне температуры 25-300°C

При увеличении температуры до 360°C и выдержке в течение 20 часов проницаемость увеличилась в 200 раз, что сопровождалось конверсией керогена 90% по параметру S2 (Рис. 6).

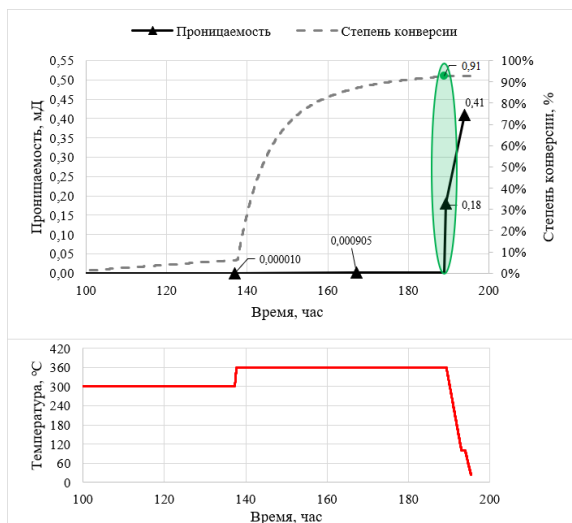


Рис. 6. Изменение проницаемости образца при температурах от 300 до 360°C

В связи с тем, что в диапазоне температур 300-360°C проведено всего два измерения проницаемости, определить достоверную математическую



связь проницаемости и температуры в данном диапазоне температуры не представляется возможным. Для этого необходима серия из нескольких экспериментов, проведенных при тех же условиях с аналогичными образцами пород.

Полученные результаты показывают необходимость учета литостатического давления при экспериментальном моделировании процессов, протекающих в пласте в условиях тепловых МУН. В проведенных экспериментах наблюдался целый ряд эффектов, влияющих на ФЕС пород, не характерных для экспериментов, проведенных в отсутствии литостатического давления.

В диапазоне температур от 25 до 300 °С наблюдалось снижение проницаемости. Показано, что основной причиной снижения проницаемости является термическое расширение керогена, а термическое расширение минеральной матрицы и набухание глинистых минералов носит вторичный характер.

При достижении температуры выше 300 °С зафиксировано несколько процессов, включая компакцию образца, преобразование структуры и повышение пористости керогена, а также образование сети микротрещин, что в совокупности приводит к повышению проницаемости в 200 раз по сравнению с начальным значением.

Полученные данные могут быть использованы для последующей адаптации корреляции ФЕС от температуры в ходе гидродинамического моделирования, а также подтверждают необходимость комплексного изучения и учёта влияния температуры и давления на ФЕС при моделировании и разработке сланцевых месторождений с использованием термических МУН.

### **Литература**

1. Спасенных М., Маглеванная П., Козлова Е., Булатов Т., Леушина Е., Морозов Н. Геохимические тренды, отражающие генерацию, миграцию и накопление углеводородов в нетрадиционных коллекторах на основе данных пиролиза (на примере баженовской свиты). *Geosciences*. Vol. 11. No. 8, 2021, doi: 10.3390/geosciences11080307.
2. Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Казаненков В.А., Конторович В.А., Костырева Е.А., Пономарева Е.В., Рыжкова С.В., Ян П.А. Баженовская свита – основной резерв нетрадиционной нефти в России / *Актуальные пробл. нефть газ*, том 2, № 10, с. 1-8, 2014.
3. Спасенных М., Широкова В., Ильменский А., Козлова Е., Булатов Т., Гончарова А., Леушина Е. Кинетика термической трансформации органического вещества в исходных породах: Обзор методов и экспериментальных результатов // *Георесурсы*. 2024. Т. 26. № 4. С. 3-19.

4. Карамов Т., Уайт В., Идрисова Е., Козлова Е., Бурухин А., Морковкин А., Спасенных М. «Изменения карбонатной минеральной матрицы и микроструктуры керогена в органически богатых сланцах Доманика при безводном пиролизе», *Minerals*. Vol. 12. No. 7. 2022, doi: 10.3390/min12070870.
5. Субботина М., Мухина Е., Карамов Т., Попов Е., Козлова Е., Морковкин А., Мухаметдинова А., Прочухан К., Черемисин А. Эволюция коллекторских свойств сланцевых пород при гидротермальной обработке: Исследования от микро- до макромасштаба. *Geoenergy Sci. Eng.* 2023. Т. 22
6. Fang X., Cai Y., Hu Q., Liu D., Gao P., Qian Y., Jia Q. Удерживание углеводородов и его влияние на эволюцию поровой структуры морских сланцев на основе экспериментов по моделированию пиролиза. *Energy & Fuels*. Vol. 36. No. 22, pp. 13556-13569, Nov. 2022, doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c02684.

УДК 553.98

# АНАЛИЗ ЦИКЛИЧНОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ НЕФТЯНЫХ СЛАНЦЕВ: СВЯЗЬ С КЛИМАТОМ, ОРБИТАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЗЕМЛИ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ПОРОД

Спасенных М.Ю., Карамов Т.И., Козлова Е.В., Попов Ю.А.,  
Севастьянова С.А., Тягузов Д.М., Торшина Л.С.  
Сколковский институт науки и технологий (Сколтех)  
M.Spasennykh@skoltech.ru

Нефтематеринские породы с высоким содержанием органического вещества («нефтяные сланцы») имеют сложное строение и характеризуются значительными вариациями состава и свойств по разрезу. Формации имеют циклическое строение, что выражается в повторяющихся вариациях содержания и состава органического вещества, неорганической матрицы и петрофизических свойств. Исследования цикличности являются составной частью литолого-геохимических исследований, необходимых для изучения условий формирования пород, а также для оптимизации технологий разведки и разработки месторождений сланцевых углеводородов. Одной из причин цикличности являются изменения климата, связанные с вариациями инсоляции (поток солнечной радиации), обусловленными изменениями орбитальных параметров Земли (циклы Миланковича [1]).

Работа посвящена изучению цикличности морских нефтематеринских пород на примере баженовской свиты (БС)

центральной части Западной Сибири. Наряду с известными особенностями циклического строения баженовской свиты с выделением от пяти до семи литологических пачек мощностью от одного до нескольких метров [2]), в настоящей работе выделена цикличность с 12-15 циклами на метр разреза, выражающаяся в вариациях содержания и состава органического вещества и минеральной матрицы пород.

Цикличность пород БС исследовалась на керне скважины, пробуренной в центральной части Западно-Сибирского НГБ. Разрез БС мощностью более 40 м. исследован методом оптического сканирования тепловых свойств [3] с определением высокоразрешающего профиля ТОС (Total Organic Carbon) по петрофизическим корреляциям [4]. В итоге, по профилю теплопроводности, зарегистрированному с разрешением 1 мм, было выявлено более 400 циклов ТОС в интервале от 5% до 25%. Для одного метра разреза БС проведены детальные исследования на керне с отбором образцов через 1 см. с применением комплекса методов, включая пиролиз Rock-Eval, гамма спектрометрию, рентгено-флуоресцентный и рентгенофазовый анализ, а также исследование изотопного состава пород. Наряду с вариациями ТОС (Рисунок 1), в разрезе обнаружена аналогичная цикличность по пиролитическим характеристикам ОВ (S0, S1, S2, S3, PI, OSI), содержанию макро (Al, Si, K, S, Fe, Ca) и микро (U, Ti, Zn, Mo и др.) элементов, минеральному составу (кварц, глинистые минералы, полевые шпаты, карбонаты), а также по изотопному составу серы, азота и органического углерода пород.

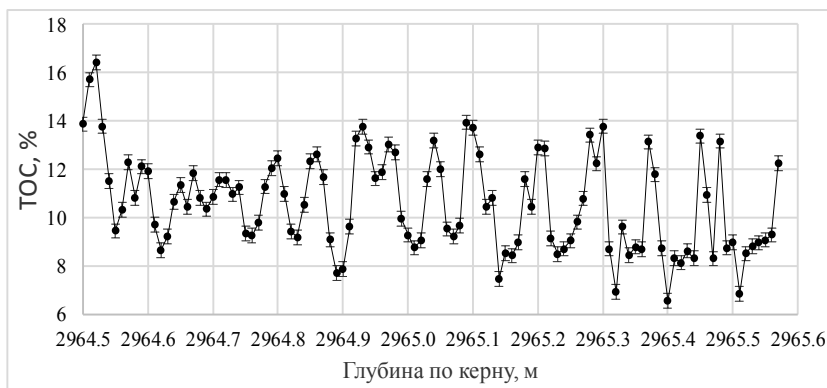


Рис. 1. Профиль ТОС на интервале керна длиной 1 м. (пиролиз Rock-Eval)

Показано, что цикличность связана с регулярными изменениями палеоклимата, приводящими к вариациям температуры,

биопродуктивности, объема и состава континентального стока, а также скорости осадконакопления. С использованием данных по возрасту осадков [2] и математического моделирования циклов Миланковича [5] установлено, что периодичность циклов отвечает циклам инсоляции продолжительностью около 20 тысяч лет. Обсуждаются возможности использования данных по цикличности для датирования отложений, корреляции скважин, анализа процессов осадконакопления, диагенеза и катагенеза пород, а также генерации, миграции и аккумуляции углеводородов. Анализ цикличности нефтематеринских пород различного возраста может также дать ценную информацию об изменениях орбитальных параметров Земли, которые определяют инсоляцию и изменения климата в различные периоды геологической истории.

Авторы благодарят ОАО «Газпромнефть» за предоставление ядерного материала.

### **Литература**

1. Milankovitch M. K. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem //Royal Serbian Academy Special Publication. 1941. Т. 133. Р. 633.
2. Панченко И., Немова В., Смирнова М. и др. Стратификация и детальная корреляция баженовского горизонта в центральной части Западной Сибири по данным литолого-палеонтологического изучения керна и ГИС // Геология нефти и газа, № 6. 2016. С. 22-34.
3. Popov E., PopovY., RomushkevichR., Spasennykh M., Kozlova E. Detailed profiling organic carbon content of oil shales with thermal core logging technique // 6th EAGE Shale Workshop, Apr 2019, Volume 2019, p. 1-5.
4. Попов Е., Карамов Т., Попов Ю., Спасенных М., Козлова Е. Способ определения общего содержания органического углерода в нефтенасыщенных сланцах. RU 2720582, 2020.
5. Laskar J., Fienga A., Gastineau M. and Manche H. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth // A&A. 2011. 532, A89.

УДК 532.5; 519.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛАХ  
С НЕРОВНЫМИ СТЕНКАМИ

Сулейманова К.И., Солнышкина О.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

karina5o5@mail.ru

Изучение влияния неровностей стенок каналов на распределение потока необходимо для оптимизации систем сортировки частиц и теплообменников, где шероховатость может изменять характер течения жидкости, вызывать локальные завихрения и увеличивать поверхность теплообмена. Экспериментальный и численный анализ позволяет выявить компромисс между интенсификацией процессов (сортировка, теплообмен) и ростом гидравлического сопротивления, что необходимо для проектирования энергоэффективных устройств с управляемыми характеристиками потока.

В рамках данной работы проведено комплексное численное и экспериментальное исследование течения жидкости в канале с треугольными неровностями на поверхности стенок. В первую очередь была проведена серия экспериментов по течению жидкости в каналах с поперечным прямоугольным сечением (высота канала 25 мкм), каверны треугольной формы (ширина 50 мкм и длина 100 мкм). Расчеты проводились с использованием программного комплекса ANSYS. Для различных объёмных расходов были получены картины течения жидкостей в боковых кавернах, а также рассмотрено влияние изменения геометрии треугольников и направления потока на пропускную способность микроканала.

Результаты проведённых работ подтверждают, что степень шероховатости стенок микроканалов влияет на гидродинамические характеристики потоков, что открывает новые горизонты для создания энергоэффективных устройств в микроэлектронике и топливных системах в аэрокосмонавтике.

### Литература

1. Батыршин Э. С., Солнышкина О. А., Питюк Ю. А. Изучение особенностей пропитки сред с двумя масштабами пористости // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – № 4. – С. 553-557.
2. Zamula Y. S. et al. Experimental study of the multiphase flow in a pore doublet model // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1421. – № 1. – С. 012052.

УДК 532.5

АПРОБАЦИЯ ПОДХОДА ПО ПОДБОРУ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИН  
АВТОГРП В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ ДЛЯ НАСТРОЙКИ  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПМ «REXLAB»  
И ПК «РН-КИМ»

Тимершаехова А.Я.<sup>1,2</sup>, Давлетбаев А.Я.<sup>1,2</sup>, Муллағалиев Б.И.<sup>1</sup>,  
Штинов В.А.<sup>1</sup>, Минибаев М.Р.<sup>1</sup>, Тимершаехов Д.Ф.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН БашНИПИнефть», Уфа, Россия

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
AYa\_Timershaekhova@BNIPI.rosneft.ru

В низкопроницаемых коллекторах заводнение осуществляется при давлениях закачки в нагнетательных скважинах выше минимального смыкающего напряжения. Это приводит к самопроизвольному развитию трещин автоГРП в нагнетательных скважинах [1], в отдельных случаях – преждевременному обводнению соседних добывающих скважин. Для снижения данных рисков необходимы эффективные инструменты прогнозирования, одним из которых является цифровая гидродинамическая модель в ПК «РН-КИМ». Процесс настройки цифровой модели на промысловые данные является трудоёмким. Для ускорения процесса предлагается подход по автоматическому поиску геометрии трещин автоГРП.

Для апробации подхода выбрана секторная модель месторождения Западной Сибири с площадной системой разработки и нагнетательными скважинами с развитием трещин автоГРП. Предлагаемый подход проведения оптимизации имеет следующий план: вначале создается проект в ПМ «RExLab», загружается текстовая модель, далее проводится оптимизация с использованием стохастически варьируемых параметров и заданием метрик для выбора наилучшей модели. В результате определяется гидродинамическая модель, которая обеспечивает наилучшую схожимость с историческими данными по каждой скважине.

Разработанный подход, реализованный в ПМ «RExLab», позволил подобрать параметры трещин автоГРП, при которых расхождение расчетных данных по добыче нефти по скважинам составило ~4% от исторических данных.

### Литература

1. Губайдуллин М.Р. и др. Исследование перепада давлений между нагнетательными скважинами с самопроизвольным развитием трещин гидроразрыва пласта // Прикладная механика и теоретическая физика. 2024.

УДК 532.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФИЛЬТРАЦИЮ  
УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ

Тулубаева Р.Р., Хасанова Я.Р., Валиуллина В.И.,

Галеев Р.Р., Мусин А.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

@rasimatulubaeva95@gmail.com

Для повышения эффективности извлечения нефти крайне важно изучить влияние электромагнитных полей (ЭМП) на высоковязкие углеводороды, такие как нефть, битум и устойчивые нефтяные эмульсии [1]. Целью работы является экспериментальное исследование влияния ЭМП на фильтрацию углеводородной жидкости (нефти).

Экспериментальное исследование фильтрации нефти с вязкостью при н. у.  $\mu=7,2$  мПа·с проводилось на специально собранной установке, которая включает в себя ячейки с вытравленными на проводящих стеклах электродами, генератор ЭМП, компрессор, контроллер и регулятор давления, весы и термостат. Electrodes in the cells were placed perpendicular and along the filtration of the liquid. Experiments were conducted at temperature  $t=20\div60^\circ\text{C}$  with a step of  $10^\circ\text{C}$  and pressure fluctuations  $p=5\div15$  кПа с шагом 5кПа при частоте поля  $f=5$  МГц.

Обнаружено, что воздействие маломощного ЭМП приводит к увеличению вязкости нефти из-за поляризации молекул нефти и образования более крупных кластеров, что повышает внутреннее трение. Получено, что при расположении электродов поперек потока ЭМП снижает расход, а при расположении вдоль потока расход остаётся практически неизменным, что объясняется изменением структурно-механических свойств нефти, которые требуют дальнейших исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-11-20042).

### Литература

1. Лоскутова Ю. В., Юдина Н. В. Влияние постоянного магнитного поля на реологические свойства высокопарафинистых нефтей // Коллоидный журнал. – 2003. – Т. 65. – № 4. – С. 510-515.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ  
ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК НА ГИДРОДИНАМИКУ  
ПОТОКА ЖИДКОСТИ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ПО ТРУБОПРОВОДАМ

Уликанов Р.Р.

ООО «НИИ Транснефть», г. Москва, Россия

rim\_oil@mail.ru

Транспортировка жидкости (вода, нефть, нефтепродукты, газовый конденсат) по трубопроводам сопряжена со значительными энергозатратами на транспортировку. В связи с чем, одной из ключевых задач, является повышение энергоэффективности или снижение временных, материальных затрат при возникновении необходимости увеличения производительности трубопровода. Одним из способов решения данной задачи стало использование противотурбулентных присадок (ПТП) (англ. «Drag reducing agents» (DRAs)).

ПТП делятся на два типа: гелеобразные и дисперсионные (суспензионные). Активным компонентом гелеобразных ПТП - высокомолекулярный полимер, дисперсионных (суспензионных) ПТП - суспензия на жидкой основе.

Механизм действия ПТП обусловлен эффектом резкого снижения коэффициента гидравлического сопротивления (эффект Б.А. Томса 1948г.).

На текущий момент существует множество подходов по объяснению «эффекта Томса», одна из современных моделей - модель «флуктуационного слоя» работы [1-3]. Механизм работы [4]: при добавлении ПТП её молекулы разворачиваются и смещаются в пристеночную область, где формируется флуктуационный слой, который обеспечивает гидравлическую гладкость для основного потока жидкости, «затягивает» выход в режим с полным проявлением шероховатости.

На стендовом оборудовании ООО «НИИ Транснефть» [5] установлено, что используемые ПТП имеют различную эффективность, которая зависит в том числе от пройденного ею расстояния в трубопроводе (Рисунок 1). Так же ПТП характеризуются различными параметрами скорости формирования и деградации флуктуационного слоя.

В работе предложен метод подбора наиболее эффективной ПТП исходя из сравнения интегральных показателей эффективности её действия в трубопроводе. В качестве исходных данных используются графики зависимости эффективности ПТП от пройденного расстояния (Рисунок 1) полученные на стендовой установке. Анализ производится



путем сравнения полученных площадей под каждой кривой на заданной длине трубопровода.

Например, на Рисунке 1, на интервале длин от 0 до 2550 м, наибольшая площадь находится под кривой соответствующей ПТП (1); на интервале от 0 до 3000 м, наибольшая площадь находится под кривой соответствующей ПТП (2); при этом если экстраполировать полученные данные, то на интервале от 0 до 18000 м наибольшая площадь уже будет находится под кривой соответствующей ПТП (3). Из представленных на Рисунке 1 ПТП, ПТП (1) будет самой эффективной для трубопроводов стеновой установки длиной от 0 до 2550м, ПТП (2) 2550 – 18000м, ПТП (3) более 18000м. Соотношение между длиной трубопроводов установки и длиной магистрального трубопровода определяется исходя из обработки статистических данных о применении ПТП на магистральных трубопроводах и результатах испытаний, либо с использованием методов математического моделирования.

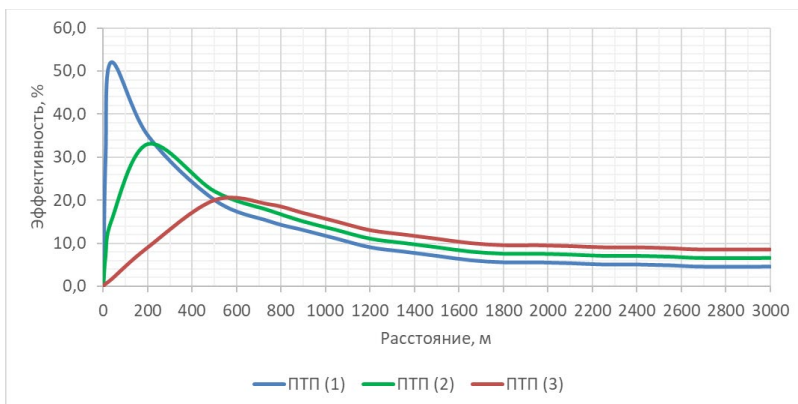


Рис. 1. График изменения эффективности ПТП в зависимости от пройденного расстояния

Таким образом, для выбора наиболее эффективной ПТП, с точки зрения гидравлической эффективности, необходимо учитывать значение интегрального показателя эффективности ПТП достигаемой для трубопровода (участка трубопровода) заданной длины.

### Литература

1. Ерошкина И.И. Повышение пропускной способности магистральных нефтепродуктопроводов на основе применения противотурбулентных присадок: дис. канд. техн. наук: 25.00.19 /

- Ерошкина Ирина Игоревна – РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М., 2003. – 146 с.
2. Зверева Т.В., Челинцев С.Н., Яковлев Е.И. Моделирование трубопроводного транспорта нефтехимических производств. – М.: Химия. –1987. – 175 с.
  3. Манжай В.Н. О механизме снижения гидродинамического сопротивления добавками полимеров // Межмолекулярные взаимодействия и электронные процессы в жидкостях. – Новосибирск: Наука. – 1986. – С. 45-48.
  4. Валиев М.И., Жолобов В.В., Тарновский Е.И. К вопросу о механизме действия высокомолекулярных противотурбулентных присадок // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 3. – С. 18-26.
  5. Мингазетдинов Р.Ф., Валиев М.И., Бортник В.В., Зверев Ф.С., Несын Г.В., Авдей А.В. Стенд для исследования агентов снижения гидравлического сопротивления при транспортировке нефти или нефтепродуктов по трубопроводу. Патент RU 2659747. Опубл. 03.07.2018, Бюлл. № 19.

УДК 532.546

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ К НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОЙ СКВАЖИНЕ

Уразов Р.Р.<sup>1</sup>, Ахметова О.В.<sup>1</sup>, Давлетбаев А.Я.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

UrazovRR@bni.rosneft.ru

Модель наклонно-направленной скважины (ННС) является одной из наиболее часто используемых в программных комплексах, предназначенных для анализа и интерпретации результатов гидродинамических исследований скважин. Анализ известных аналитико-численных моделей показывает, что в них используются два алгоритма [1,2]: многосегментный и односегментный. Первый характеризуется как точный, но медленный с вычислительной точки зрения. Второй менее точный, но значительно превосходит по скорости. В связи с этим актуальным является разработка нового алгоритма, который бы включал в себя достоинства обоих подходов.

В представленной работе получены решения задач о нестационарной фильтрации к несовершенной скважине с произвольным углом наклона от вертикали, в которых используются указанные алгоритмы. Решения найдены методом источников, основанным на использовании функций Грина [2], в комбинации с интегральным преобразованием Лапласа [2].

Для реализации односегментного алгоритма была определена зависимость координаты точки эквивалентного давления от угла наклона скважины и от положения центра вскрытой части пласта, что позволило уточнить аппроксимирующее решение. Для определения динамики давления использовался численный алгоритм обратного преобразования Стефеста.

Оба подхода к расчету забойного давления в ННС реализованы в программном комплексе «РН-ВЕГА» [3], предназначенном для анализа и интерпретации результатов гидродинамических исследований скважин.

Проведенные вычислительные эксперименты показывает, что результаты расчетов, полученные с использованием многосегментного и уточненного односегментного алгоритмов, хорошо согласуются между собой и с результатами других исследователей (рис. 1).

Разработанные модели ННС могут быть использованы для расчета притока к стволу как полностью, так и частично вскрывающей пласт скважины. В предельных случаях отклонения участка перфорации от вертикали ( $\beta = 0, 90^\circ$ ) расчеты по модели ННС согласуются с расчетами по моделям вертикальной и горизонтальной скважин соответственно [1].

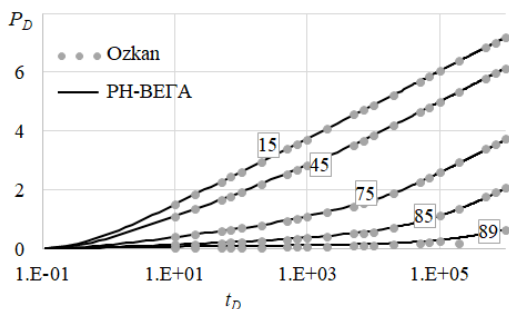


Рис. 1. Сопоставление безразмерных решений РН-ВЕГА с результатами, опубликованными Ozkan [4]. Шифр кривых соответствует углу отклонения ННС от вертикали

### Литература

1. Urazov R. R. et al. High-speed method for calculating directional well stream in the RN-VEGA software (Russian) //Neftyanoe khozyaystvo-Oil Industry. – 2023. – Т. 2023. – №. 11. – С. 37-42.
2. Уразов Р.Р., Ахметова О.В., Галлямитдинов И.И., Давлетбаев А.Я., Сарапулова В.В., Пестриков А.В. Моделирование динамики забойного давления в наклонно направленной скважине //

- Прикладная механика и техническая физика. – 2024. – Т. 65. – № 6 (388). – С. 99-112.
3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023612604 RU. Программный комплекс «РН-ВЕГА» / Р. Р. Уразов, О. В. Ахметова, Э. И. Бабичев и др.; правообладатель ПАО «НК "Роснефть"». № 2023612604; Заявл. 25.01.2023; Оpubл. 06.02.2023.
  4. Ozkan E., Raghavan R. A computationally efficient, transient-pressure solution for inclined wells //SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2000. – Т. 3. – №. 05. – С. 414-425.

УДК 532.546

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЗОННОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАЦИОНАРНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

Ураимов А.А.<sup>1</sup>, Поташев К.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского К(П)ФУ,  
Казань, Россия  
KPotashev@mail.ru

Рассмотрен вопрос гидродинамического анализа и прогноза эффективности многозонного гидроразрыва нефтяного пласта (МГРП) [1–3]. Общая эффективность разложена на интенсификацию добычи нефти и повышение нефтеотдачи области дренирования. Выполнена оценка вклада каждой составляющей в модельных условиях в зависимости от размеров и частоты расположения трещин проводимости. Предложен метод быстрого гидродинамически обоснованного подбора параметров МГРП, обеспечивающих наивысший средний коэффициент извлечения нефти на всем интервале времени разработки. Алгоритм основан на анализе поля времени пролета частиц, вычисляемого вдоль мгновенных линий тока, полученных из решения стационарной задачи для давления в момент проведения МГРП. Такая структура течения учитывает неоднородность зоны дренирования и позволяет оценить области слабого вовлечения запасов нефти в процесс вытеснения. Применимость метода продемонстрирована на модельных примерах однородного и зонально-неоднородного пласта с зоной пониженной проницаемости вдоль горизонтальной скважины, а также на примере кубов пористости и проницаемости тестовой модели SPE-10.

### Литература

1. Поташев К.А., Ураимов А.А., Мазо А.Б. Определение длин трещин многозонного гидроразрыва пласта с помощью модели фильтрации в трубах тока // Матем. моделирование. 2025, 37, 1, с. 131-150.

2. Potashev K.A., Mazo A.B., Mukhina M.V., Uraimov A.A., Maklakov D.V., Khamidullin M.R. High-speed algorithm for computing the inflow to multiple-fractured horizontal wells using stream tubes // Computational Geosciences. 2024, 28, p. 1389-1411.
3. Mazo A.B., Khamidullin M.R., Potashev K.A., Uraimov A.A. Mathematical Model of Water- and Oil-Soluble Tracers Transfer in Studying Multistage Hydraulic Fracturing // Fluid Dynamics. 2024, 59, 3, p. 427-443.

УДК 532

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ АНОМАЛЬНО ТЕРМОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Урманчиев С.Ф.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия  
said52@mail.ru

Рассмотрены особенности математического моделирования течения жидкостей с немонотонной зависимостью вязкости от температуры. Система дифференциальных уравнений, описывающих течение аномально термовязких жидкостей при наличии теплообмена с окружающей средой построена на основе законов сохранения массы, количества движения и внутренней энергии. Описано введение характерных геометрических и физических параметров рассматриваемой задачи, с помощью которых полученная система уравнений приводится к безразмерному виду и определяются критерии подобия.

Немонотонная зависимость вязкости от температуры может быть обусловлена влиянием различных факторов. Например, к такого рода зависимости может привести трансформация их сложного молекулярного строения в процессе изменения температуры. В качестве примера можно привести термозависимые потокоотклоняющие реагенты на основе раствора метилцеллюлозы. Среди минералов этим свойством обладает расплав серы, атомы которой в определённом интервале температур способны к образованию полимерных цепочек с соответствующим ростом вязкости, а затем к их разрушению, вследствие чего вязкость снижается. Течение этих жидкостей в каналах, на стенках которых заданы условия теплообмена, сопровождается распределением вязкости, соответствующим неоднородному температурному полю. Образующаяся высоковязкая зона в значительной мере определяет гидравлическое сопротивление потоку. Она может иметь форму арки, степень удлинения которой будет зависеть от граничных условий на стенках канала. Немонотонная зависимость вязкости от температуры предполагает формирование высоковязкой зоны на границе раздела нагретой и

холодной частей одной и той же жидкости. Эта зона или вязкий барьер в дальнейшем перемещается в соответствии с процессом конвективной теплопроводности и может принять фиксированное положение в зависимости от отношения интенсивности теплообмена и расхода жидкости. При недостаточной величине теплообмена сформировавшийся вязкий барьер покинет пределы расчётной области, так как, например, втекающая нагретая жидкость не будет охлаждаться в достаточной степени. С другой стороны, возможна ситуация, при которой область вязкого барьера будет столь велика, что это приведёт к многократному уменьшению расхода жидкости.

Впечатляющим результатом проведённых исследований стало обнаружение автоколебательных режимов изменения расхода аномально термовязких жидкостей. Основным условием их возникновения стало разбиение канала на две части по его длине и постановка различных условий теплообмена на стенках каждой из частей. Для достижения поставленной цели в первой части канала должны быть поставлены граничные условия первого рода, соответствующие условиям Дирихле. При этих условиях интенсивность теплообмена будет высокой, а вязкий барьер примет форму арки, постепенно вытягивающейся по направлению течения. Основания арки будут примыкать к угловым точкам входного сечения канала и, в дальнейшем, оставаться неподвижными. Во второй части канала могут быть поставлены граничные условия третьего рода или, иначе, условия Неймана. Достигнув границы раздела со второй частью канала, интенсивность теплообмена в которой значительно ниже, передний фронт вязкого барьера распадается, а следующая за ним нагретая жидкость начнёт втекать во вторую часть канала с ещё холодной жидкостью. Поскольку вязкий барьер, образовавшийся в первой части, ограничивает область течения нагретой жидкости, то в результате её дозированного смешения с холодной жидкостью, образуется значительная по размерам зона с температурой, соответствующей высоковязкой области. Расход жидкости при этом уменьшается до такой степени, что теплообмен начинает играть роль большую, чем конвективная теплопроводность. В первую очередь это коснётся первой части канала с большей интенсивностью теплообмена, в которой вязкий барьер сначала восстановит свою форму, а затем уменьшится до первоначального состояния. Восстановление формы вязкого барьера в первой части канала будет означать, что во вторую часть нагретая жидкость поступать не будет и высоковязкая область в ней будет вытеснена потоком, так как условия её поддержания иссякнут. В итоге, вся термогидродинамическая система примет своё первоначальное состояние. Далее процесс будет циклически повторяться, что и будет означать возникновение автоколебаний.

Численные исследования позволили установить области существования автоколебательных режимов течения аномально термовязких жидкостей в пространстве изменения геометрических параметров канала, относительных перепадов давления и интенсивности теплообмена.

Работа выполнена при поддержке средствами госбюджета по Госзаданию 124030400064-2 (FMRS-2024-0001).

УДК 537.872.32

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО НАГРЕВА

Усманов Б.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
bulatusman@mail.ru

В рамках данной работы был разработан метод решения обратной задачи для определения диэлектрических свойств, основанный на параметрической оптимизации математической модели электромагнитного нагрева по соответствующим экспериментальным данным. Для этого был использован квазиньютоновский метод L-BFGS (или «Метод Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно с ограниченной памятью»).

В качестве объектов исследования были выбраны вода и этанол, поскольку для них существуют достоверные табличные данные диэлектрических свойств на частоте 13.56 МГц, которая использовалась для нагрева.

Жидкости наливались в специально спроектированную ёмкость с секциями, разделёнными воздушной прослойкой, что позволило пренебречь теплообменом внутри секций и между ними. Ёмкость помещалась между обкладками цилиндрического конденсатора и проводился электромагнитный нагрев. Замер температуры осуществлялся тепловизором. Полученные экспериментальные данные температурной динамики были использованы для определения диэлектрических свойств при помощи разработанного метода.

В таблице 1 приведены сравнения полученных значений диэлектрических свойств с табличными.

Таблица 1 – Экспериментальные и табличные свойства диэлектрических свойств.

	$\varepsilon_{\text{эксп}}$	$\varepsilon_{\text{табл}}$	Отклонение, %	$tg\delta_{\text{эксп}}$	$tg\delta_{\text{табл}}$	Отклонение, %
Вода	89.257	80.13	11.39	0.302	0.272	11.03
Этанол	19.81	24.5	19.14	0.119	0.09	32.22

Как видно из таблицы 1, имеют место существенные отклонения от табличных значений. Отчасти это объясняется тем, что для применения метода нужны весьма точные температурные данные, поскольку даже сравнительно малые отклонения измеренной температуры от истинной могут привести к значительному отклонению рассчитанных значений.

УДК 519.63

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОДА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАССЛОЕНИЯ СУСПЕНЗИИ

Фаррахетдинова А.И.<sup>1</sup>, Сахибгареев Э.Э.<sup>1,2</sup>, Мусин А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>2</sup>ООО «ПОЛИКОД», Казань, Россия

azaliyafarr@mail.ru

В эпоху современности разработаны множество программных пакетов, позволяющих моделировать различные физические процессы. Такие инструменты, в частности, имеют широкое применение в нефтегазовой отрасли для решения различных задач. Однако многие из них имеют определенные недостатки, такие как: платная лицензия, ограничение в коммерческом использовании, отсутствие гибкой настройки системы и другие. Среди множества задач практический интерес, например, представляет решение задачи расслоения суспензии проппанта в процессе гидравлического разрыва пласта.

Данная работа посвящена разработке программного кода для численного моделирования процесса седиментации в дисперсных системах. Рассматривается сосуд высоты  $L$ , который заполнен дисперсной системой. Дисперсная система представляет собой взвешенные в жидкости твердые сферические частицы, находящиеся в поле тяготения. В данной работе исследуется процесс расслоения дисперсных систем в однородном поле силы тяжести, который описывается уравнением (1) [1].

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}(C(1-f_p)v_{sed}) + D\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (1)$$



где  $C$  – концентрация,  $f_p = \rho_p/\rho$  – массовая доля диспергированной фазы,  $v_{sed}$  – скорость оседания частиц по Стоксу с учетом функции стесненного осаждения,  $D$  – коэффициент диффузии.

Решение данного уравнения осуществляется с помощью метода контрольного объема (МКО) по неявной схеме [2] с применением алгоритма трехдиагональной матрицы (TDMA, алгоритм Томаса) для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений.

Алгоритм решения реализован в виде программного кода на языке программирования Python с применением встроенных библиотек Numpy и Matplotlib. Программа позволяет вводить необходимые параметры системы и получать на выходе набор концентраций в каждый момент времени и графическую реализацию решения (Рис.1). Из рисунка видно, что в процессе седиментации концентрация частиц в верхней части сосуда убывает (правая часть на рис. 1), тогда как в нижней части сосуда концентрация частиц возрастает (левая часть на рис. 1). Расчеты показали, что интенсивность осаждения частиц зависит как от размеров частиц, так и от начальной концентрации частиц в исходной суспензии, что объясняется взаимным влиянием частиц.

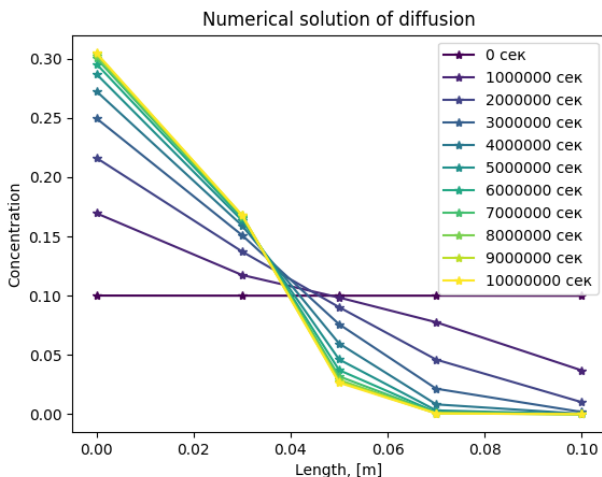


Рис. 1. Распределение концентрации частиц по высоте сосуда в процессе седиментации

Результатом данной работы является программный код, позволяющий моделировать процесс седиментации с возможностью выбора параметров. Для разработки программного кода сформулирована математическая модель и разработан численный алгоритм решения.

Проведена валидация разработанной программы. Разработанный код может быть использован для моделирования распределения проппанта в трещине гидравлического разрыва пласта и для моделирования расслоения эмульсий, стабилизированных поверхностно-активными веществами.

### Литература

1. Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А. численное моделирование ламинарного течения суспензии в плоском канале // Вестник Башкирского университета. 2021. Т. 26. № 2. С. 281-286.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости // Москва: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1984. 152 с.

УДК 532.546

### ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ КОЭФФИЦИЕНТНОЙ ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

Хайруллин М.Х.<sup>1,2</sup>, Бадертдинова Е.Р.<sup>2</sup>, Абдуллин А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИММ – структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия

m.khairullin@mail.ru

В последние годы получили широкое развитие технологии глубинных измерений, позволяющие с высокой точностью и большим разрешением осуществлять мониторинг температуры и давления потока внутри скважины на протяжении длительного времени. Данные технологии дают возможность существенно расширить информацию о нефтяном пласте.

В работе предлагается математическая модель для описания термогидродинамических процессов в нефтяном пласте и в стволе горизонтальной скважины с учетом потери давления, вызванные притоком флюида в ствол горизонтальной скважины.

Разработан вычислительный алгоритм для интерпретации кривых изменения температуры, снятых одновременно несколькими глубинными измерительными приборами, установленными в различных участках ствола горизонтальной скважины на основе методов регуляризации А.Н. Тихонова. Он позволяет строить профиль притока вдоль ствола горизонтальной скважины, оценивать фильтрационные свойства пласта при различных режимах течения жидкости в стволе горизонтальной скважины.

По предложенному методу оценивается неоднородность пласта вдоль горизонтальной части ствола скважины. Этим методом проведена

интерпретация кривых изменения температуры и давления, зарегистрированных в реальной горизонтальной скважине РТ.

УДК 532.1

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ НЕФТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Хасанова Я.Р., Тулубаева Р.Р., Валиуллина В.И., Галеев Р.Р.,  
Мусин А.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
misyasippi1234@gmail.ru

Водонефтяные эмульсии при воздействии на них электромагнитным полем (ЭМП) ведут себя непредсказуемо [1], и их поведение малоизучено. Целью настоящей работы является экспериментальное определение вязкости нефти в прямоугольном канале под воздействием ЭМП.

В настоящей работе объектом исследования являлась нефть, вязкостью при нормальных условиях  $\mu=8,93$  мПа·с. Эксперименты выполнялись на специально сконструированной установке, где основным элементом являлась прямоугольный канал с внутренними размерами  $26 \times 1$  мм. Для создания ЭМП на боковых проводящих стёклах ячейки были вытравлены электроды, которые были расположены поперёк фильтрации жидкости. Давление создавалось с помощью компрессорного насоса и управлялось регулятором давления, для построения зависимостей массы от времени использовались высокоточные весы AND GR-300. Данные по массе выводились на компьютер с помощью программы RS Weight. Эксперименты проводились при перепаде давления  $p=10 \div 30$  кПа с шагом 5кПа. Температура в ячейке замерялась с помощью тепловизора Infray P2 PRO.

Были получены зависимости расхода жидкости от давления при течении жидкости без внешнего воздействия и в присутствии ЭМП. Обнаружено, что воздействие электромагнитного поля значительно увеличивает расход жидкости по сравнению с отсутствием воздействия. Это связано с нагревом нефти в ячейке под воздействием высокочастотного ЭМП, приводящем к снижению её вязкости. Вязкость нефти была оценена на основе уравнения Гагена-Пуазейля и сравнивалась с данными ротационного вискозиметра. Установлено, что методика применима для оценки вязкости нефти в условиях воздействия ЭМП.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-27-00181.

## Литература

1. Кухарева Е.В., Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В. Влияние магнитного поля на структурно-реологические характеристики смолистых нефтей и их эмульсий // Химия в интересах устойчивого развития. – 2023. – Т. 31. – № 1. – С. 110-117.

УДК 532.5, 537.868

### НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЧ ЭМП

Хисматуллина Ф.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия

<sup>2</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Россия  
Farida.Khismatullina@lukoil.com

В данной работе представлена задача о высокочастотном воздействии на пласт, содержащий высоковязкие парафинистые нефти. Для моделирования процесса неизотермической фильтрации в присутствии источника ВЧ ЭМП используется система уравнений, которая учитывает процессы массо- и теплопереноса, возникновение объемных источников тепла в результате взаимодействия с ВЧ ЭМП, фазовое состояние флюида.

Смешивающиеся вытеснение одной жидкости другой интенсивно изучается, при этом имеется два подхода для постановки закона сохранения массы: первый записывается в терминах давления и насыщенности ( $P$ ,  $S$ ), откуда рассчитываются свойства компонентов, второй записывается в терминах давления и молярной плотности компонента ( $P$ ,  $N_c$ ), откуда, зная PVT-соотношения, рассчитываются свойства фаз. Первый подход использовался для описания моделей «dead oil» [1], второй метод - при описании летучей нефти и композиционных систем [2].

В первом случае кроме уравнения пьезопроводности в модель вводятся уравнения конвективной диффузии смешивающихся фаз и граничные условия для концентраций каждой фазы, полученные из закона сохранения массы. Во втором случае фильтрационное течение смешивающихся фаз описывается интегральным законом сохранения вещества в общем виде, и уравнения для концентрации каждой фазы отдельно не используются.

В зависимости от способа описания процесса плавления также существуют разные подходы: 1) модель с плавлением на границе фазового перехода – задача Стефана, 2) модель с фазовым переходом в объеме, т.е. плавление рассматривается как кинетический процесс, происходящий в некотором объеме среды.

В работе приводится сравнение результатов моделирования различными способами поставленной задачи.

## Литература

1. Эртекин Т., Абу-Кассем Дж., Кинг Г. Основы прикладного моделирования пластов. Ижевск: ИКИ, 2012. – 1060 с.
2. Борисов В.Е. и др. Композиционная неизотермическая модель фильтрации в пористой среде с учетом химических реакций и активной твердой фазы // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. – 32 с.

УДК 532.546

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКТИВНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ЭКОЛОГИИ НЕДР

Шарафутдинов Р.Ф., Рамазанов А.Ш., Валиуллин Р.А.  
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
ООО НПФ ГеоТЭК  
gframil@inbox.ru

Большинство скважин нефтяных месторождений имеют значительный срок эксплуатации, вследствие этого наблюдается разрушение цементного камня, коррозия эксплуатационных колонн и т.д. Все это в совокупности создают условия возникновения заколонных перетоков. Заколонные перетоки в скважинах нефтяных месторождений как правило приводят к осолонению пресноводных горизонтов, т.е. к нарушению экологии недр.

Для решения задачи по определению источника загрязнения используются различные методы, среди них, наиболее эффективным и достоверным методом является термометрия, однако традиционная термометрия не всегда однозначна, особенно при определении заколонных перетоков «сверху». В этом случае оптимальным является использование активной термометрии, которая основана на использовании искусственных источников тепла.

На рис.1 приведены результаты скважинных исследований методом активной термометрии при определении заколонного перетока «сверху».

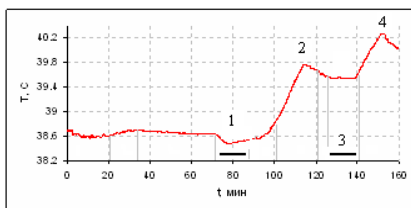


Рис. 1. Изменение температуры в точке при двукратном локальном индукционном нагреве

Наличие заколонного перетока подтверждается выносом из заколонного пространства тепловой метки в ствол скважины (участки 2 и 4, рис.1) при двухкратном локальном индукционном нагреве колонны (участки 1 и 3, рис.1).

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ по теме "Разработка инновационной технологии на основе метода активной термометрии для решения задач экологии пресноводных горизонтов" (соглашение № 23-17-20017 от 20 апреля 2023 г.).

УДК 532

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СУСПЕНЗИЙ В НАКЛОННЫХ И ПЕРЕКРЁСТНЫХ КАНАЛАХ

Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

regina.you@mail.ru

Транспорт дисперсных систем в каналах сложной конфигурации представляет ключевую задачу для нефтегазовой отрасли, особенно при закачке проппанта в разветвленные и наклонные трещины гидроразрыва. В работе исследуется течение суспензии в крестообразном и наклонном каналах.

Математическая модель процесса построена в одножидкостном приближении и включает уравнение неразрывности для дисперсной системы, систему уравнений движения дисперсной системы и уравнение сохранения объемной концентрации частиц [1]. Решение системы уравнений осуществлено численно в программной среде OpenFOAM с применением метода контрольных объемов.

В результате исследования динамики твердых взвешенных частиц в плоском канале в зависимости от угла наклона выявлено, что с увеличением угла расстояние, на которое продвигается фронт частиц, уменьшается и нелинейно зависит от соотношения чисел Рейнольдса для течения дисперсной системы и частиц. Построена зависимость безразмерного расстояния, на которое продвинулся фронт частиц от безразмерного угла наклона канала при разных значениях скорости закачки.

Для перекрестного канала исследовано влияние соотношения длины основного и вторичного канала с различными граничными условиями на торцах каналов. На основе расчетов построены кривые эффективности заполнения основного канала в зависимости от соотношения чисел Рейнольдса для жидкости и частиц. Выявлено, что снижение пропускной способности в случае открытого торца основного канала происходит

заметно позже, чем с закрытым торцом, что приводит к повышению степени заполнения канала.

Полученные результаты могут быть использованы для проведения оценочных вычислений продвижения фронта частиц в зависимости от геометрии канала и параметров потока.

### **Литература**

1. Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Валиуллина В.И., Ковалева Л.А. Математическое моделирование течения суспензии в системе пересекающихся трещин // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 201-211.

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

*Научное издание*

## **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА: МОДЕЛИ И ПРИЛОЖЕНИЯ**

**Сборник тезисов**

**IV Международной летней школы-конференции  
(г. Уфа, 29 июня–4 июля 2025 года)**

*Электронное издание сетевого доступа*

*За достоверность информации, изложенной в статьях,  
ответственность несут авторы.*

*Статьи публикуются в авторской редакции*

Подписано к использованию 23.12.2025 г.  
Гарнитура «Times New Roman». Объем 4,89 Мб.  
Заказ 359.

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»  
450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.*

Тел.: +7-908-35-05-007  
e-mail: ric-bdu@yandex.ru