

На правах рукописи



КОВАЛЬЧУК ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

**МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПАРОЦИКЛИЧЕСКОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ В СКВАЖИНЕ И В ПЛАСТЕ**

Специальность: 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Тюмень – 2025

Работа выполнена на кафедре Моделирования физических процессов и систем Тюменского государственного университета

Научный руководитель: Шевелёв Александр Павлович,
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры моделирования
физических процессов и систем Тюменского
государственного университета

Официальные оппоненты: Рамазанов Айрат Шайхуллинович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры геофизики ФГБОУ ВО
«Уфимский университет науки и технологий»

Жижимонтов Иван Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
эксперт управления по геологии и разработке
месторождений Ямал, ООО «РН-Геология.
Исследования. Разработка»

Ведущая организация: ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»

Защита состоится «17» декабря 2025 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета 24.2.418.02 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 410.
Тел.: 8-919-948-97-71

E-mail: t.n.kovalchuk@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан «__» 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.418.02
д. ф.-м. н.

С. Ю. Удовиченко

Актуальность темы исследования

В настоящее время существует значительное число месторождений высоковязкой нефти. При этом Россия является четвертой страной по доказанным запасам тяжелой нефти (около 22% запасов приходится именно на высоковязкую нефть). Такие коллекторы, как правило, разрабатывают с помощью тепловых методов увеличения нефтеотдачи (МУН). Среди традиционных тепловых МУН выделяют парогравитационный дренаж, паротепловое воздействие, внутрипластовое горение и пароциклическую обработку скважины (ПЦО); к альтернативным тепловым МУН относятся электромагнитные технологии, радиочастотное, микроволновое и ультразвуковое воздействия.

Одним из перспективных тепловых МУН является пароциклическая обработка скважин. ПЦО включает в себя три этапа: закачка пара, паротепловая пропитка и добыча нефти. Основной физический механизм, лежащий в основе метода, состоит в снижении вязкости нефти за счет увеличения температуры. Среди преимуществ ПЦО по сравнению с другими тепловыми МУН выделяют: отсутствие необходимости бурения нагнетательных скважин, сравнительно низкие тепловые потери, большая энергоемкость пара в сравнении с горячей водой, а также большая степень разработанности метода относительно альтернативных тепловых МУН. Метод ПЦО подтвердил свою эффективность и успешно применяется с 1960-х годов. Следует отметить, что применение тепловых МУН без предварительных исследований с помощью методов физико-математического моделирования менее эффективно.

Важное значение имеет прогнозирование фазового состава теплоносителя, поскольку при движении пара в скважине происходит конденсация, что в значительной степени влияет на прогнозные значения дополнительно добываемой нефти за счет ПЦО. Необходимо также рассматривать процессы тепломассопереноса в насыщенной пористой среде, учитывая влияние конвективных потоков, поскольку тепловые процессы существенно влияют на объем прогретой нефти, подвижность которой будет увеличена за счет ПЦО. Помимо этого, востребованным направлением является разработка экспресс-методики для расчета объема дополнительно добываемой нефти за счет ПЦО. К настоящему времени вышеперечисленные проблемы при физико-математическом моделировании ПЦО не были решены в полной мере.

Таким образом, разработка интегральных математических моделей, позволяющих прогнозировать сложные теплофизические процессы в нефтенасыщенной пористой среде при ПЦО, является актуальной задачей.

Цель работы: комплексное исследование процессов тепломассопереноса при пароциклическом воздействии на всех участках движения теплоносителя в системе скважина-пласт для оптимизации длительности этапа добычи нефти.

Задачи:

1. Разработка физико-математической модели движения двухфазного теплоносителя внутри скважины с зонально-неоднородными теплофизическими свойствами, опирающейся на данные геофизических температурных исследований.

2. Разработка физико-математической модели пароциклического воздействия на пористую среду, насыщенную высоковязкой нефтью, с учетом вынужденных и естественно конвективных потоков, в которой фронт конденсации совершает поступательное и вращательное движения.

3. Верификация разработанной физико-математической модели пароциклического воздействия на пласт высоковязкой нефти, путем сопоставления расчетных данных глубины проникновения теплового поля с результатами гидродинамического моделирования.

4. Получение корреляционной зависимости для определения прироста объема добываемой нефти при пароциклическом воздействии от основных теплофизических параметров теплоносителя.

5. Создание на основе разработанных физико-математических моделей методики комплексного исследования процессов тепломассопереноса при пароциклическом воздействии на всех участках движения теплоносителя в системе скважина-пласт.

Объектом исследования являются тепловые процессы при пароциклическом воздействии на нефтенасыщенную пористую среду.

Предметом исследования является рассмотрение параметров теплоносителя и тепловых процессов, влияющих на прогретую область нефтенасыщенной пористой среды.

Научная новизна:

1. Разработана физико-математическая модель движения пароводяной смеси по стволу скважины, впервые позволяющая на основе данных кратковременных динамических температурных исследований, заменяющих эмпирическую корреляцию давления и температуры на линии насыщения, описывать двухфазные и однофазные потоки теплоносителя (*пункт 1. Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования*

молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидкоком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах).

2. Разработана физико-математическая модель пароциклического воздействия на пласт, насыщенный высоковязкой нефтью, в которой фронт конденсации совершает поступательное и вращательное движения, впервые на основе балансовых соотношений позволяющая описать тепломассоперенос в процессе естественной и вынужденной конвекции, а также доминирующий механизм теплообмена в насыщенной пористой среде путем введения безразмерных комплексов (*пункт 1*).

3. На основе разработанных моделей создана методика исследования процессов тепломассопереноса при пароциклическом воздействии на всех участках движения теплоносителя в системе скважина-пласт, учитывающая динамику теплового поля по результатам геофизических исследований скважин и дающая возможность оценить влияние теплоизоляции насосно-компрессорных труб на фазовый состав теплоносителя.

4. В результате статистической обработки расчетных данных, полученных на основе модельных решений задачи о пароциклическом воздействии на нефтяные пластины, установлена функциональная двухпараметрическая зависимость пятого порядка для прироста объема дополнительно добытой нефти от основных теплофизических параметров теплоносителя, имеющая точность более 80%.

(пункт 8. Численное и натурное моделирование теплофизических процессов в природе, технике и эксперименте, расчет и проектирование нового теплотехнического оборудования).

Теоретическая значимость:

1. Разработанная физико-математическая модель позволяет интерпретировать результаты кратковременных динамических температурных исследований теплового поля в стволе скважины с учетом зональной неоднородности теплофизических параметров конструкции скважины.

2. Учет режимов течения на специфику процессов распространения тепловых потоков позволяет повысить точность описания тепломассопереноса в пористой среде при пароциклическом воздействии на пластины, насыщенные высоковязкой нефтью.

Практическая значимость:

1. Разработанная физико-математическая модель пароциклического воздействия на пласт, которая учитывает динамические температурные измерения по стволу скважины, позволяет рассчитывать теплофизические параметры двухфазного теплоносителя при его движении по стволу скважины

точнее на 8% по сравнению с известной моделью, которая дает точность в 13% относительно экспериментальных данных.

2. Учет режимов течения на специфику процессов распространения тепловых потоков с помощью безразмерных комплексов позволяет при описании тепломассопереноса в пористой среде при пароциклическом воздействии на пласты, насыщенные высоковязкой нефтью, позволяет повысить прогнозируемое значение объема дополнительно накопленной добычи нефти на 7%.

Методология и методы исследования

В диссертационной работе используются методы физико-математического моделирования, включающие в себя разработку математической модели, состоящей из системы балансовых уравнений теплофизики. Численные решения были получены с помощью метода Эйлера.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель тепломассопереноса пароводяной смеси, которая построена на основе учета данных кратковременных динамических температурных исследований и, соответственно, сокращения количества эмпирических замыкающих соотношений, и которая позволяет рассчитать радиальные тепловые потоки вдоль скважины.

2. Физико-математическая модель процесса пароциклического воздействия на нефтяные пласты, насыщенные высоковязкой нефтью, которая учитывает вынужденные и естественные конвективные потоки, содержит безразмерные комплексы и дает возможность оценить влияние естественной и вынужденной конвекции, а также доминирующий механизм теплообмена в процессе тепломассопереноса в насыщенной пористой среде.

3. Методика, созданная на основе разработанных моделей для исследования процессов тепломассопереноса при пароциклическом воздействии на всех участках движения теплоносителя в системе скважина-пласт, позволяющая учитывать динамику теплового поля по результатам геофизических исследований скважин, и дающая возможность оценить влияние теплоизоляции насосно-компрессорных труб на фазовый состав теплоносителя.

4. Найденная на основе разработанной методики корреляционная зависимость, которая позволяет определить прирост объема добываемой нефти при пароциклическом воздействии от основных теплофизических параметров теплоносителя, таких как удельная изобарная теплоемкость и удельная теплота фазового перехода.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов исследования обусловлена корректной физической постановкой задачи, созданием математической модели на основе общих подходов теплофизики и механики многофазных систем с выбранными допущениями, физичностью результатов и отсутствием противоречий с результатами ранее проведенных фундаментальных исследований, применением классических численных методов при решении системы уравнений.

Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

- Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова. 2023. г. Белгород.
- XIII Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию образования математического и физического факультетов БашГУ. 2022. г. Уфа.
- X Школа-семинар молодых ученых "Трансформация нефтегазового комплекса 2030". 2023. г. Тюмень.
- Двадцать седьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-27. 2023. г. Екатеринбург.
- Двадцать шестая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-26, Уфа, Башкортостан). 2020. г. Уфа.
- XIV Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании». 2023. г. Уфа.
- Международная научная конференция «Комплексный анализ, математическая физика и нелинейные уравнения». 2024. г. Уфа
- XI Школа-семинар молодых ученых "Трансформация нефтегазового комплекса 2030". 2024. г. Тюмень.
- Двадцать девятая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-29. 2025. г. Пушкино.

Структура и объем работы

Текст диссертационной работы состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 24 рисунка, 9 таблиц и список литературы, состоящий из 171 наименований.

Личный вклад автора заключается в разработке физико-математических моделей и получении корреляции для объема дополнительно добытой нефти в зависимости от основных теплофизических параметров; численном решении уравнений полученных математических моделей; анализе полученных результатов; написании статей и тезисов, выступлениях на конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в числе которых одна работа индексируется базой данных Russian Science Citation Index, три работы входят в издание из перечня ВАК, девять входят в базу РИНЦ. Исследования проводились при поддержке гранта РФФИ №20-45-720002.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении путем анализа современной литературы обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, ставится цель исследования и задачи для ее достижения, указываются научная новизна, теоретическая и практическая значимости результатов диссертационной работы.

В первой главе выполнен анализ современного состояния исследований в области теплового воздействия на нефтяные пласты, рассмотрены численные и аналитические модели пароциклического воздействия на нефтяной пласт. В работе отмечается, что среди традиционных тепловых МУН ПЦО является одним из наиболее эффективных. Существенное внимание уделяется работам следующих авторов: J.E. Gontijo и K. Aziz, T.C. Boberg и R.B. Lantz, S. Gozde и H.S. Chhina, J. Jones, N.A. Myhill и G.L. Stegemeier, J. van Lookeren в области моделирования ПЦО. Рассматриваются актуальные работы моделирования ПЦО с применением численных методов и введением новых допущений относительно формы прогретой области и механизмов, способствующих увеличению нефтеотдачи, и применением моделирования в гидродинамических симуляторах. Также в работе отмечается, что в настоящее время возник тренд на моделирование ПЦО с помощью машинного обучения. Показано, что новый метод может давать хорошие прогнозные варианты для теплофизических процессов, однако, его физический смысл недостаточно очевиден, в отличии от способа анализа теплофизических процессов с помощью законов теплофизики путем составления системы уравнений при введении допущений.

Разработка физико-математических моделей ПЦО является актуальной задачей ввиду необходимости добычи высоковязкой нефти. При этом моделирование позволяет оптимизировать процесс ПЦО.

Во второй главе представлена физико-математическая модель для движения пароводяной смеси, учитывающая данные динамики температуры теплоносителя по стволу скважины. Эта модель состоит из двух подзадач: первая позволяет рассчитать изменение давления, скорости и массовой концентрации пара в зависимости от вертикальной координаты (внутренняя задача); вторая – определение температурного распределения по радиальной координате от центра внутренней части скважины до окружающей породы включительно (внешняя задача). Внутренняя и внешняя задачи рассматриваются в одномерном приближении ввиду симметрии процессов.

Физико-математическая модель движения пароводяной смеси вдоль ствола скважины (внутренняя задача) включает в себя следующие допущения: пренебрегается процессами теплообмена за счет теплопроводности окружающей породы, поскольку преобладают конвективные процессы (из расчетов числа Пекле); межфазное трение отсутствует ввиду односкоростного приближения; применяется приближение Ловерье, предполагающее постоянство температуры теплоносителя в поперечных сечениях ствола скважины. Такое приближение оправдано, если радиальные тепловые потоки незначительны по сравнению с осевыми. В рассматриваемой модели, как показано в диссертации на основе критериальных оценок, преобладают массовые силы, в то время как вклад сил вязкого трения существенно меньше. На практике учет нестационарных эффектов проявляется в процессах запуска и остановки скважины, а также при наличии колебаний давления или изменения параметров источника, однако длительность этих периодов не значительна по сравнению с рабочим режимом. Поэтому в разработанной модели предполагается, что течение установившееся, характеристики потока (поля скорости, давления и температуры) не меняются со временем. Это допущение справедливо, если параметры работы скважины (дебит, давление на забое) поддерживаются постоянными в течение длительного времени. Технологические сложности подачи перегретого пара к скважине приводят к тому, что наиболее эффективна закачка двухфазной смеси пара и воды на линии насыщения. В реальности, из-за трения и теплообмена с окружающими породами, двухфазная смесь может иметь незначительные отклонения от линии насыщения, которыми можно пренебречь, поскольку силы трения малы. Это позволяет использовать уравнения состояния для насыщенного пара и воды, что упрощает описание термодинамических свойств смеси. В рамках сделанных допущений пар моделируется как идеальный газ. Это стандартное приближение, справедливое при относительно низких давлениях. В случае значительных перепадов давления, существенную роль играет сжимаемость пароводяной смеси. Однако, во встречающихся на практике перепадах

давления по стволу скважины влиянием сжимаемости пароводяной смеси можно пренебречь.

Предложенная в диссертации методика предполагает решение внешней задачи, поскольку в рамках эйлерова подхода к описанию движения пароводяной смеси необходим расчет источниковых членов. Выделяются прямая и обратная задачи тепломассопереноса в системе скважина-окружающая порода. В рамках прямой задачи по известным теплофизическим характеристикам многослойной конструкции скважины и породы определяется тепловой поток на внутренней стенке насосно-компрессорной трубы. Обратная задача подразумевает определение коэффициента теплоотдачи на основе данных о распределении температуры в стволе скважины.

Первым пунктом разработанной методики исследования процессов тепломассопереноса при пароциклическом воздействии на всех участках движения теплоносителя в системе скважина-пласт является решение прямой задачи. В данной задаче рассматривается скважина, имеющая слоистую конструкцию, каждый из слоев которой обладает своей теплопроводностью. Теплопроводности всех материалов, таких как сталь, базальтовое волокно, вода и порода (например, песчаник), известны.

В данной постановке задача описывается уравнением теплопроводности, которое представляет процесс передачи тепла через слоистую конструкцию скважины. В данной модели теплопроводности стали обозначается как λ_1 , для базальтового волокна λ_2 , для воды λ_3 , а для окружающей породы λ_4 . Также учитывается коэффициент теплоотдачи пароводяной смеси, обозначенный как α . Температуры на границах слоев обозначаются как T_1, T_2, T_3, T_4 и T_5 при вертикальной координате z равной нулю, где T_1 — это температура внутренней стальной стенки, а T_5 — температура породы, которая не подвергалась нагреву. Для решения прямой задачи, в которой необходимо определить температурное распределение в слоях скважины и породе, записывается уравнение теплопроводности, описывающее стационарный процесс.

Тепловой поток для всех слоев имеет следующий вид:

$$Q = \frac{\pi \Delta z (T_{j-1} - T_j)}{\frac{1}{2\lambda_j} \ln \frac{d_j}{d_{j-1}}} \quad (1)$$

где j — порядковый номер, Δz — высота слоя, d_j — диаметр j -го слоя.

Таким образом было рассчитано распределение температуры в нескольких однородных слоях скважины и в окружающей породе.

Поскольку система уравнений является не замкнутой (при неизвестном массовом расходе) следует использовать критериальное уравнение:

$$Nu = 0,023 Pr^{0,4} Re^{0,8} \sqrt{1 + \left(\frac{\rho}{\rho_s} - 1\right) C} \quad (2)$$

где число Рейнольдса $Re = 4G/(\pi\mu d)$, G – массовый расход смеси, μ – коэффициент динамической вязкости, d – внутренний диаметр насосно-компрессорной трубы, Pr – число Прандтля, C – массовая доля пара в теплоносителе, ρ – плотность пароводяной смеси, ρ_s – плотность пара.

Эта формула получена экспериментально Е.П. Ананьевым, Г.Н. Кружилиным и Л.Д. Бойко.

При известном массовом расходе вычисляется тепловой поток в каждой расчетной ячейке.

После этого рассчитывается коэффициент теплопереноса в i -ой расчетной ячейке K_i , что позволяет определить коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_i = \frac{1}{d \left(\frac{1}{K_i} - \sum R_j \right)} \quad (3)$$

где R_j – коэффициент термического сопротивления j -го слоя.

За счет использования кратковременных динамических температурных исследований (КДТИ) не требуется использовать критериальное уравнение, поскольку коэффициент теплоотдачи определяется формулой (3).

Таким образом, коэффициент теплоотдачи, используемый далее в расчетах объема дополнительно добытой нефти, уточняется за счет использования экспериментальных данных температуры вдоль оси скважины.

С целью решения внутренней задачи была записана в рамках допущений система уравнений теплофизики и механики многофазных систем, описывающая одномерное течение пароводяной смеси в скважине. Эта физико-математическая модель движения пароводяной смеси на основе данных кратковременных динамических температурных исследований включает закон сохранения массы для теплоносителя в следующем виде:

$$\frac{d}{dz} ((\rho_s C + (1 - C)\rho_w)v) = 0 \quad (4)$$

где C – сухость пара, ρ_s и ρ_w – плотности пара и воды соответственно, v – скорость теплоносителя при движении вдоль скважины.

Закон сохранения импульса учитывает потери напора из-за трения по формуле Альтшуля, в котором введен коэффициент C_d , зависящий от режима течения (ламинарный или турбулентный), геометрии скважины и шероховатости стенок. Этот закон записывается в виде:

$$\frac{dp}{dz} = (\rho_s C + (1 - C)\rho_w) \cdot (g + C_d v^2) \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, p – давление.

Закон сохранения энергии учитывает удельные энталпии пара i_s и воды i_w как линейные функции от температуры и записывается следующим в виде:

$$\frac{d}{dz}((\rho_s Ci_s + (1 - C)\rho_w i_w)v) = \frac{Q}{\pi h r_w^2} \quad (5)$$

где h – глубина скважины, r_w – радиус скважины, а удельный тепловой поток через многослойную стенку скважины определяется из решения внешней задачи по формуле (1).

При этом для решения внутренней задачи задаются следующие граничные условия: на устье скважины известна постоянная скорость закачки пара, которая рассчитывается через постоянный расход нагнетаемой пароводяной смеси Q_s , массовая концентрация пара и давление имеют постоянные значения C_0 и P_0 соответственно:

$$z = 0: v = \frac{Q_s}{\pi r_w^2}, C = C_0, P = P_0 \quad (6)$$

Замыкающими соотношениями для системы уравнений (4)-(5) являются уравнение Менделеева-Клапейрона и функция для энталпии.

Искомыми переменными в системе уравнений (4)-(5) являются $v, P, C, i_s, i_w, q, \rho_s$ (при интерпретации измеренных данных температуры вдоль оси скважины) или T (при классическом подходе).

В отличие от традиционных подходов Чарного и других авторов, предложенный метод позволяет исключить из модели эмпириическую корреляцию давления и температуры на линии насыщения.

Для решения системы уравнений (4)-(5) с граничными условиями (6) применялся метод Эйлера. В расчетах использовались значения температуры теплоносителя, измеренные с помощью кратковременных динамических температурных исследований (КДТИ) на одном из месторождений Северо-Востока России.

Решение этой задачи позволяет получить значения для скорости, температуры, массовой концентрации пара и давления теплоносителя в зависимости от вертикальной координаты, распределение которого приведено на рис. 1.

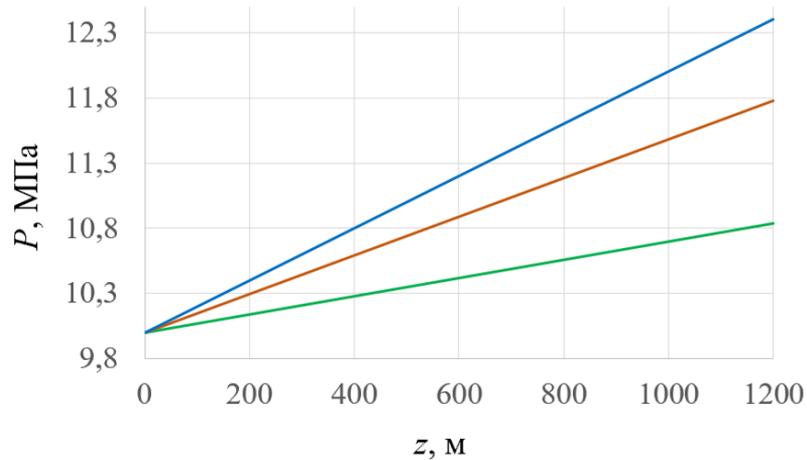


Рис. 1. Распределение давления в теплоносителе вдоль ствола скважины, где синяя линия – экспериментальные значения давления, зеленая – расчетные значения этого параметра без учета данных КДТИ, красная – его расчетные значения с учетом данных КДТИ

Анализ расчетных данных показывает, что распределение массовой концентрации пара близко к линейному. Использование данных КДТИ позволяет рассчитать данный параметр в пределах погрешности 10% для больших значений глубин, достигающих 1200 м.

Кроме того, с помощью разработанной физико-математической модели было получено температурное распределение в слоях стенки скважины и коэффициент теплопроводности окружающей породы с учетом экспериментальных данных.

Третья глава диссертации посвящена разработке физико-математической модели процесса пароциклического воздействия на нефтяные пласты, насыщенные высоковязкой нефтью, с учетом вынужденных и естественных конвективных потоков. Этот процесс играет ключевую роль в повышении эффективности извлечения нефти из таких пластов. Основное внимание при моделировании уделяется тому, как тепловые и гидродинамические потоки влияют на тепломассоперенос в насыщенной пористой среде. Моделирование учитывает как вынужденные, так и естественные конвективные потоки, в которой фронт конденсации совершает поступательное и вращательное движения.

В работе анализируется влияние естественной и вынужденной конвекции на скорость распространения фронта конденсации и формы прогретой области. В случае доминирования вынужденной конвекции прогретая область имеет форму цилиндра. При сопоставимых естественных и вынужденных конвективных потоках прогретая область представляет собой усеченный конус. При доминировании естественной конвекции прогретая область имеет форму конуса.

При формулировке физико-математической модели учитывается, что поступающее в нефтенасыщенную пористую среду тепло с паром перераспределяется на прогрев скелета породы, нефти в призабойной зоне и тепловые потери в кровлю и подошву пласта в соответствии с законом сохранения энергии. Используется приближение Ловерье, которое позволяет перейти к одномерному описанию процесса распространения теплового поля в насыщенной пористой среде. Приближение Маркса-Лангенхайма позволяет описывать движение фронта конденсации в виде скачка температуры. В случае, когда естественной конвекцией пренебречь нельзя, переход к одномерному описанию процесса осуществляется путем введения вращающейся цилиндрической системы координат, которая также может совершать поступательное движение при сопоставимых вынужденных и естественных конвективных потоках. Этот прием позволяет описывать процесс в рамках теории плоских сечений. Таким образом, обобщенная геометрия прогретой области при пароциклическом воздействии, учитывает как смещение границы, так и изменение угла наклона прогретой области.

На рисунке 2 схематически проиллюстрирована динамика фронта конденсации в рамках сделанных допущений в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 . Фронт определяется отрезком АВ, h – эффективная нефтенасыщенная толщина пласта, r – радиальная координата, z – вертикальная координата.

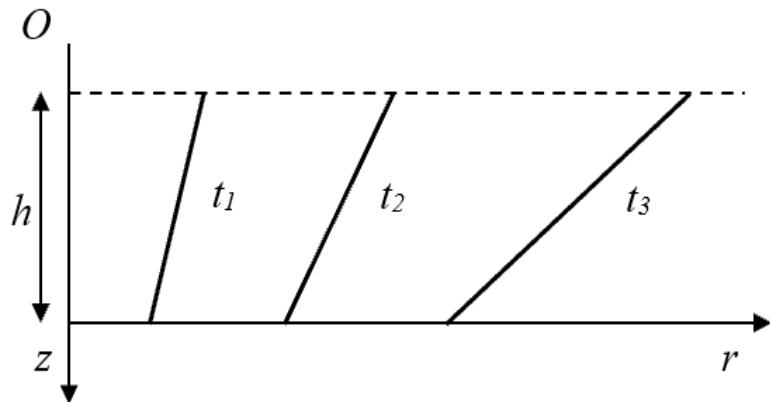


Рис. 2. Объем прогретой области для предлагаемой модели ПЦО

Предлагаемая модель была верифицирована с помощью сравнения результатов расчетов фронтов конденсации по разработанной модели (пунктирные линии) и в гидродинамическом симуляторе тНавигатор (сплошные линии) (рис. 3).

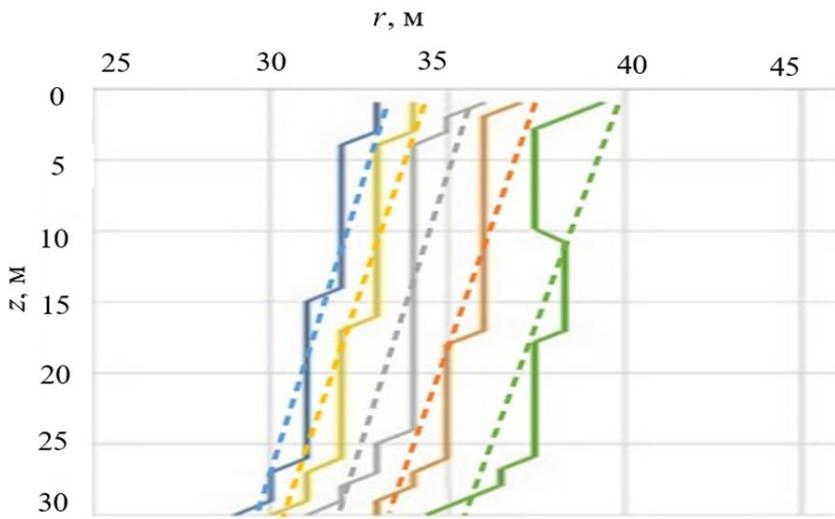


Рис. 3. Сравнение тепловых областей предлагаемой интегральной модели и модели в тНавигатор. Расположение тепловых областей, соответствующих температуре 523 К, на момент окончания закачки пароводяной смеси в пласт при разной теплопроводности породы Вт/(м · К): синяя кривая — 3,125; желтая — 2,778; серая — 2,431; оранжевая — 2,083; зеленая — 1,736

Сравнение расчетных данных показывает, что погрешность при определении положения фронта конденсации тепловых областей с помощью разработанной модели в сравнении с расчетами в гидродинамическом симуляторе составляет до 5% на расстояниях в пределах 40 м от скважины. Меньшее значение допустимой погрешности обусловлено большей чувствительностью результатов моделирования к этому параметру.

Для определения режима теплообмена и формы паровой камеры был разработан подход, основанный на введении новых безразмерных комплексов, полученных в результате обезразмеривания конвективного уравнения теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

где ρ – плотность среды, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, T – температура, t – время, u – вектор скорости движения среды, k – коэффициент теплопроводности, q_s – плотность внутренних источников тепла.

Безразмерные переменные введены следующим образом:

$$T' = \frac{T - T_r}{T_s - T_r}, u' = \frac{u}{u_s}, R = \frac{r}{r_c}, z' = \frac{z}{h}, t' = \frac{t}{t_0}$$

где T_r – температура невозмущенного пласта, T_s – температура теплоносителя, r_c – радиус прогретой области, t_0 – характерное время, u_s – скорость теплоносителя, рассчитываемая из соотношения для его расхода Q_s :

$$u_s = \frac{Q_s}{2\pi r_w h}$$

В результате такой процедуры уравнение (7) приводится к следующему виду:

$$\frac{\partial T'}{\partial t'} + \frac{\partial T'}{\partial R} + A_1 \frac{\partial T'}{\partial z'} = \frac{A_2}{u' A_1} \frac{\partial^2 T'}{\partial R^2} + A_1 \cdot \frac{A_2}{u'} \frac{\partial^2 T'}{\partial z'^2} \quad (8)$$

где введены безразмерные комплексы:

$$A_1 = \frac{r_c}{h}, \quad A_2 = \frac{2\pi r_w a}{Q_s} \quad (9)$$

Комплекс A_1 характеризует соотношение вынужденной и естественной конвекции в насыщенной пористой среде. Критерий A_2 характеризует вклад кондуктивного и конвективного теплообмена в скорость распространения теплового поля. При значениях $A_1 < 10$ естественные и вынужденные конвективные потоки сопоставимы, $A_1 \geq 10$ – естественной конвекцией можно пренебречь. Если $A_2 > 1$, то доминирует кондуктивный теплообмен, при $A_2 < 1$ доминирует конвективный теплообмен.

Эффективность метода пароциклического воздействия существенно зависит от минимизации тепловых потерь в окружающие породы – кровлю и подошву пласта. Для оптимизации этого процесса необходимо определить оптимальное время закачки пароводяной смеси и последующей выдержки скважины. Механизм тепловых потерь имеет конвективный характер и определяется законом Ньютона – Рихмана.

Предложенная модель, как и в традиционном случае, подразумевает выделение основных этапов пароциклического воздействия. Первый этап – развитие теплового поля в насыщенной пористой среде при закачке теплоносителя в пласт. Второй этап – конденсация пара в области, охваченной тепловым воздействием и приток холодной нефти в прогретую зону, за счет градиента давления, вызванного разностью плотностей паровой и жидкой фаз (паротепловая пропитка). Третий этап – добыча нефти. Эффективная длительность описанных этапов определяется аналогично интегральной модели Федорова–Шевелёва с заменой радиальной координаты неподвижной системы на координату подвижной системы:

$$\begin{aligned} \xi &= r \cos \left(\operatorname{arctg} \frac{Q_s \mu}{S k_z (dP/dz + \rho g)} \right) + \frac{Q_s}{S} t \\ \eta &= r \sin \left(\operatorname{arctg} \frac{Q_s \mu}{S k_z (dP/dz + \rho g)} \right) \end{aligned}$$

где r – радиальная координата, S – площадь, k_z – проницаемость, t – время, μ – вязкость, g – ускорение свободного падения.

Результаты численного эксперимента на основе разработанной модели по определению дополнительной накопленной добычи нефти при $A_1=5$ приведены на рис. 4.

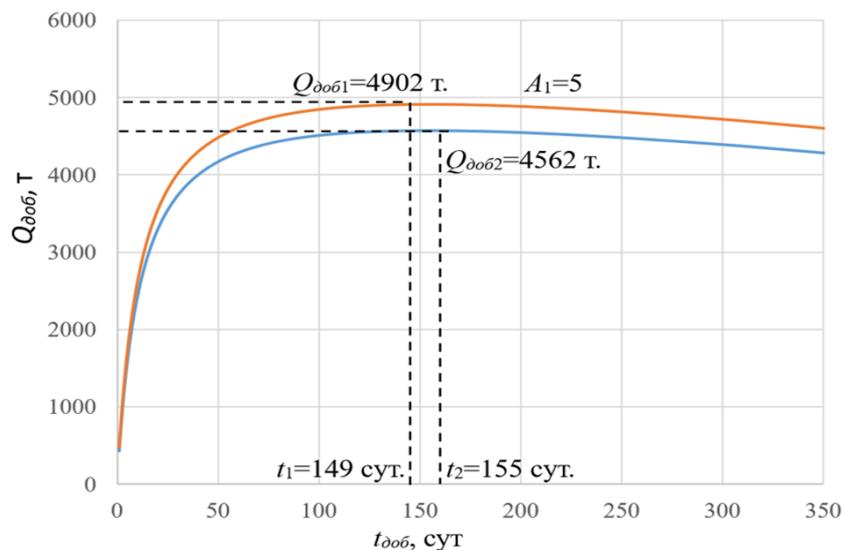


Рис. 4. Сравнение дополнительной накопленной добычи нефти при различных соотношениях естественных и вынужденных конвективных потоков.

Анализ результатов показывает, что учет естественной конвекции позволяет оптимизировать процесс пароциклического воздействия и уточнить прогнозируемое значение объема дополнительно добываемой нефти на 7%.

Четвертая глава исследования посвящена установлению корреляционной зависимости между приростом объема извлеченной нефти при пароциклическом воздействии и основными теплофизическими параметрами используемого теплоносителя. В качестве ключевых параметров теплоносителя, влияющих на объем дополнительно извлекаемой нефти, рассматриваются удельная изобарная теплоемкость (c_s) и удельная теплота фазового перехода (l), определяющие эффективность теплопередачи и, соответственно, объем извлекаемой нефти.

На основе модели процесса пароциклического воздействия на нефтяные пласты, насыщенные высоковязкой нефтью, с учетом вынужденных и естественных конвективных потоков в результате численных экспериментов на синтетических данных получена поверхность, отражающая зависимость объема дополнительно извлекаемой нефти от выбранных параметров теплоносителя (рис. 5).

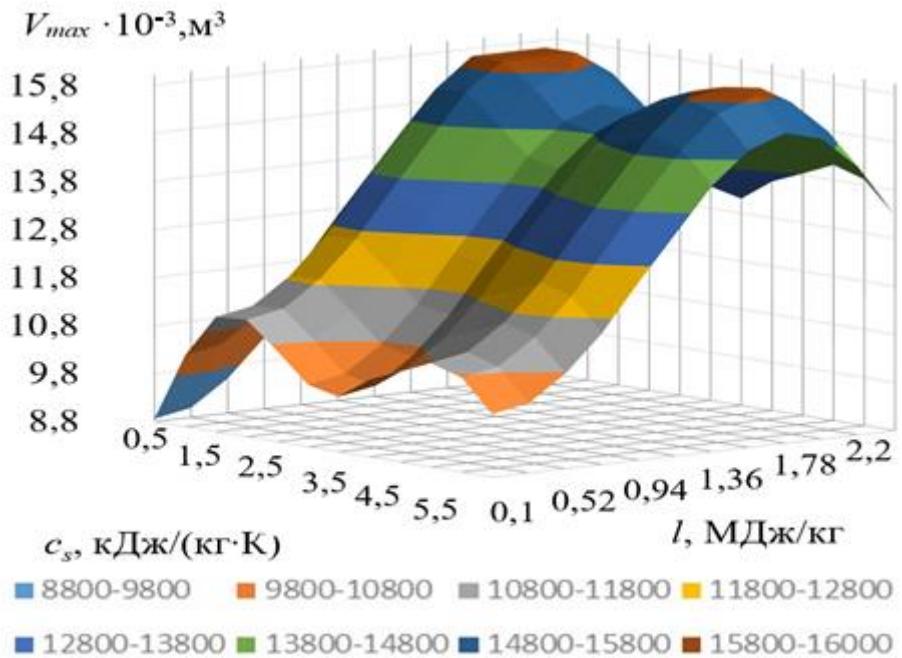


Рис. 5. Зависимость объема дополнительно извлекаемой нефти от теплофизических параметров теплоносителя. В легенде приведены значения дополнительно извлекаемой нефти V_{max} в м^3 .

Рассчитанные данные аппроксимированы полиномиальной зависимостью с определением коэффициентов корреляции между параметрами методом последовательного исключения корней Гаусса. Оценка слагаемых полученного полинома позволила пренебречь малыми величинами, в результате чего итоговая зависимость имеет вид:

$$V_{max} = k_1 c_s + k_2 c_s^2 + k_3 c_s^3 + k_4 c_s^4 + k_5 l + k_6 l^2 + k_7 \quad (10)$$

где для определения коэффициентов k_j (индекс j изменяется от 1 до 7) необходимо решить систему из 7 линейных алгебраических уравнений. Полученные значения коэффициентов k_j позволяют использовать уравнение (10) для быстрого приближенного расчета дополнительной накопленной добычи нефти при различных значениях удельной теплоемкости и удельной теплоты парообразования теплоносителя.

На основе разработанных во второй и третьей главах физико-математических моделей была сформулирована методика исследования процессов тепломассопереноса при пароциклическом воздействии на всех участках движения теплоносителя в системе скважина-пласт, заключающаяся в следующих пунктах:

- 1) решении прямой задачи тепломассопереноса в системе скважина-окружающая порода, в рамках которой по известным теплофизическими характеристикам многослойной конструкции скважины и породы

определяется тепловой поток на внутренней стенке насосно-компрессорной трубы;

2) решении обратной задачи расчета коэффициента теплоотдачи в системе скважина-окружающая порода при отсутствии экспериментальных данных по его измерению;

3) сшивке через задание граничных условий на забое скважины апробированной физико-математической модели движения пароводяной смеси на основе данных кратковременных динамических температурных исследований и верифицированной модели процесса пароциклического воздействия на нефтяные пласты, насыщенные высоковязкой нефтью, с учетом вынужденных и естественных конвективных потоков;

4) оценке режимов тепломассопереноса с использованием разработанных в третьей главе безразмерных комплексов;

5) подборе эффективных характеристик теплоносителя на основе корреляционной зависимости (10);

6) определении эффективной длительности выделенных этапов пароциклического воздействия.

ВЫВОДЫ

1. Разработана физико-математическая модель движения пароводяной смеси по стволу скважины, впервые позволяющая на основе данных кратковременных динамических температурных исследований, заменяющих эмпирическую корреляцию давления и температуры на линии насыщения, описывать двухфазные и однофазные потоки теплоносителя.

2. Показано, что созданная физико-математическая модель движения пароводяной смеси на основе данных кратковременных динамических температурных исследований позволяет минимизировать количество эмпирических корреляционных зависимостей, что приводит к увеличению точности моделирования до 8% по сравнению с известной моделью, которая дает точность в 13% относительно экспериментальных данных.

3. Определен коэффициент теплоотдачи при пароциклическом воздействии из решения обратной задачи теплопереноса в системе скважина-окружающая порода.

4. На основе обезразмеривания конвективного уравнения теплопроводности получены безразмерные комплексы, позволяющие оценивать интенсивность вынужденной и естественной конвекции в насыщенной пористой среде и вклад кондуктивного и конвективного теплообмена в скорость распространения теплового поля.

5. С помощью полученных коэффициента теплоотдачи и безразмерных комплексов разработана физико-математическая модель пароциклического воздействия на пласт, насыщенный высоковязкой нефтью, в которой фронт конденсации совершает поступательное и вращательное движения, впервые на основе балансовых соотношений позволяющая описать тепломассоперенос в процессе естественной и вынужденной конвекции, а также доминирующий механизм теплообмена в насыщенной пористой среде путем введения безразмерных комплексов.

6. В результате процедуры верификации разработанной модели процесса пароциклического воздействия на нефтяные пластины, насыщенные высоковязкой нефтью, с учетом вынужденных и естественных конвективных потоков установлено, что точность воспроизведения расчетных данных гидродинамического симулятора тНавигатор составляет более 95%.

7. Показано, что одновременный учет в модели пароциклического воздействия на пласт естественных и вынужденных конвективных потоков позволяет уточнить объем дополнительно извлекаемой нефти на 7%.

8. На основе разработанных моделей создана методика исследования процессов тепломассопереноса при пароциклическом воздействии на всех участках движения теплоносителя в системе скважина-пласт, учитывающая

динамику теплового поля по результатам геофизических исследований скважин и дающая возможность оценить влияние теплоизоляции насосно-компрессорных труб на фазовый состав теплоносителя.

9. С помощью созданной методики решены:

а) прямая задача тепломассопереноса в системе скважина-окружающая порода, в рамках которой по известным теплофизическими характеристикам многослойной конструкции скважины и породы определяется тепловой поток на внутренней стенке насосно-компрессорной трубы; б) обратная задача расчета коэффициента теплоотдачи в системе скважина-окружающая порода при отсутствии экспериментальных данных по его измерению;

проведены: а) сшивка через задание граничных условий на забое скважины апробированной физико-математической модели движения пароводяной смеси на основе данных кратковременных динамических температурных исследований и верифицированной модели процесса пароциклического воздействия на нефтяные пласты, насыщенные высоковязкой нефтью, с учетом вынужденных и естественных конвективных потоков; б) оценка режимов тепломассопереноса с использованием разработанных в третьей главе безразмерных комплексов; в) подбор эффективных характеристик теплоносителя на основе корреляционной зависимости дополнительной накопленной добычи нефти от основных теплофизических параметров; г) расчет эффективной длительности выделенных этапов пароциклического воздействия.

10. Доказано, что корреляционная зависимость объема дополнительно извлекаемой нефти от теплоемкости и удельной теплоты фазового перехода четвертого порядка позволяет достичь точности аппроксимации поверхности более 70%.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В издании, входящем в базу RSCI:

1. Kovalchuk T.N. Determination of the main technological parameters of cyclic-steam stimulationof oil reservoirs with account of heat losses along the boreholea / Gilmanov A. Y., Kovalchuk T.N., Shevelev A.P. // Computational Continuum Mechanics – 2023. – Vol. 16. – № 4. – P. 407–419. DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.4.34.

В изданиях рекомендованных ВАК РФ:

2. Ковальчук Т. Н. Анализ влияния теплофизических параметров пласта и флюида на процесс пароциклического воздействия на нефтяные пласты / А. Я. Гильманов, Т. Н. Ковальчук, Р.М. Скобликов, А. О. Фёдоров, Ё. Н. Ходжиев, А.П. Шевелёв // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2023. – Т. 9. – № 3 (35). – С. 6–27. DOI: 10.21684/2411-7978-2023-9-3-6-27.

3. Ковальчук Т. Н. Физико-математическое моделирование пароциклического воздействия на нефтяные пласты / А. Я. Гильманов, Т. Н. Ковальчук, А. П. Шевелёв // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2020. – Т. 6. – № 1 (21). С. 176-191. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-176-191.

4. Ковальчук Т. Н. Оптимизация технологических параметров при пароциклическом воздействии на нефтяные пласты / К. М. Федоров, А. П. Шевелёв, А. Я. Гильманов, Т. Н. Ковальчук // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2020. – Т. 6. – № 2 (22). С. 145-161. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-2-145-161.

В других изданиях:

5. Ковальчук Т.Н. Физико-математическая модель для определения основных технологических параметров пароциклического воздействия на нефтяной пласт / Т.Н. Ковальчук, А.Я. Гильманов, А. П. Шевелёв // Сборник докладов международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова. – 2023 Часть 20. С. 147-150.

6. Ковальчук Т.Н. Математическое моделирование основных технологических параметров пароциклического воздействия с учетом тепловых потерь по стволу скважины / Ковальчук Т.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. // Тезисы докладов XIII Международной школы-конференции

студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию образования математического и физического факультетов БашГУ. – 2022. С.23.

7. Ковальчук Т.Н. Математическая модель для вычисления оптимальных технологических параметров при пароциклическом воздействии на пласт высоковязкой нефти / Ковальчук Т.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. // Сборник материалов X школы-семинара молодых учёных по теплофизике и механике многофазных систем – 2023. С. 39-40.

8. Ковальчук Т.Н. Определение основных технологических параметров при пароциклической обработке скважин / Ковальчук Т.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. // Сборник тезисов, материалов Двадцать седьмой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-27). Ассоциация студентов – физиков и молодых ученых России. – 2023. С. 289-290.

9. Ковальчук Т.Н. Физико-математическая модель пароциклической обработки с параллельным наклонным смещением фронта прогрева/ Ковальчук Т.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. // Сборник тезисов, материалов Двадцать шестой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых России (ВНКСФ-26). Ассоциация студентов – физиков и молодых ученых России. – 2020. С. 165-166.

10. Ковальчук Т.Н. Учет естественно конвективных потоков при пароциклическом воздействии в рамках применения концепции плоских сечений / Ковальчук Т.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. // Сборник тезисов докладов XIV Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящённой 75-летнему юбилею профессоров Я.Т. Султанаева и М.Х. Харрасова. – 2023. С.14.

11. Ковальчук Т.Н. Применение подходов механики многофазных систем для моделирования двухфазной фильтрации в нефтяном пласте / Ковальчук Т.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. // Сборник материалов международной научной конференции «Комплексный анализ, математическая физика и нелинейные уравнения». – 2024. С.45.

12. Ковальчук Т.Н. Математическое моделирование пароциклического воздействия с учетом конвективных процессов в сложно построенных коллекторах / Ковальчук Т.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. // Сборник тезисов доклада на конференции XI Школы-семинара молодых учёных по теплофизике и механике многофазных систем "Трансформация нефтегазового комплекса 2030". – 2024. С.78-83.

13. Ковальчук Т.Н. Методика физико-математического моделирования процессов тепломассопереноса при пароциклическом воздействии в системе скважина-пласт / Ковальчук Т.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. // Сборник

тезисов, материалов Двадцать девятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-29). Ассоциация студентов – физиков и молодых ученых России. – 2025. С. 227-229.

Подписано в печать 11.10.2025 Тираж 120 экз
Объём 1.0 уч. изд. л, формат 60x84\16, заказ № 3241

ИП Вяткина Дарина Алексеевна, МФЦ «Копирка»
625027, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 80
Тел.: +7 (3452) 57-55-97 доп. 7202
E-mail: 7202@kopirka.ru