

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Скрылева Евгения Игоревна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
САФФМАНА-ТЕЙЛОРА, КАПИЛЛЯРНЫХ ЭФФЕКТОВ И
ХИМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ НА
ПРОЦЕСС ВЫТЕСНЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ
ПОРИСТОЙ СРЕДЫ**

Специальность 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

- Научный руководитель** – *Смирнов Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор.*
- Официальные оппоненты** – *Афанасьев Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник НИИ механики МГУ*
- Турунтаев Сергей Борисович, доктор физико-математических наук, директор института динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук.*
- Осипцов Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, руководитель проектного центра по энергопереходу и ESG в Сколковском институте науки и технологий.*

Защита диссертации состоится «9» июня 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.5 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119192, Москва, Мичуринский проспект, д. 1, НИИ Механики МГУ, кинозал.

E-mail: pelevina.daria@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/011.5/2491>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.011.5, кандидат
физико-математических
наук



Д.А. Пелевина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В диссертации рассматриваются вопросы, связанные с особенностями математического и численного моделирования процесса многофазной фильтрации в пористых средах. В частности, рассмотрено моделирование вытеснения углеводородов из нефтяного пористого пласта с применением различных методов увеличения нефтеотдачи, с учётом многомасштабности процессов фильтрации и влияния капиллярных эффектов. Проведено отдельное изучение капиллярных эффектов в условиях микрогравитации в искусственной пористой среде, позволяющей провести детальную видеорегистрацию процесса пропитки.

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью создания новых, более точных методов моделирования процессов многофазной фильтрации.

Полученные в работе результаты могут оказаться полезными как для земных технологий, в том числе для нефтедобычи, так и для космических приложений.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы численного моделирования неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды рассматривались во многих исследованиях [Варга Р., 1974; Каневская Р.Д., 2003; Самарский А.А., 1976; Aziz K., 1994; Batycky, 1997; Кадет В.В., 2008], также хорошо изучена фильтрация с учётом капиллярных эффектов [Rapoport L.A. and Leas W.J., 1953; Leverett M.C., 1939, 1941; Jörg Klatt, 2008; Gaulke D., 2015; Grah A., 2010], фильтрация с учётом химических реакций между фазами и внутрипластовое горение [Aldushin A.P., 1998; Chapman S.J., 2003; Babkin V.S., 1995; Bunev V.A., 2012; Палесский Ф.С., 2014; M. Abdul Mujeebu, 2009, 2010; Вольпин С.Г., 2013, 2014; Kravchenko M.N., 2018], но проблемы совместного влияния одновременно нескольких факторов до настоящего момента не исследовались. Кроме того, неразработанными остаются проблемы масштабного переноса результатов лабораторного исследования, так как задача является многомасштабной и вопрос переноса результатов мелкомасштабного моделирования с высоким разрешением на макромасштабное моделирование с меньшим разрешением до настоящего момента также не разработан.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является исследование процесса неустойчивого многофазного течения сквозь пористую среду с учетом влияния капиллярных эффектов и химических взаимодействий между фазами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Разработать математическую модель и программный пакет для моделирования процесса вытеснения вязкой жидкости из пористой среды. Провести трёхмерное численное моделирование процесса неустойчивого вытеснения вязкой жидкости на мелком масштабе с высоким разрешением. Провести проверку разработанного программного пакета и математической модели путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными.

- Разработать метод подсчёта площади межфазной границы при моделировании. Исследовать влияние различных факторов на эволюцию поверхности раздела жидкости при неустойчивом вытеснении вязкой жидкости посредством менее вязкой жидкости из пористой среды.

- Разработать метод, позволяющий учесть мелкомасштабную неустойчивость при моделировании процесса вытеснения на крупном масштабе.

- Разработать математическую модель и программный пакет для моделирования процесса вытеснения нефти из пористого пласта термогазовым методом (то есть – при наличии химических взаимодействий между фазами) с учётом неустойчивости развивающейся на мелком масштабе. Провести серию численных экспериментов для проверки эффективности термогазового метода и исследования влияния дополнительных факторов, связанных с неустойчивостью вытеснения на динамику вытеснения.

- Разработать математическую модель и программный код для моделирования процесса многократной пропитки пористой среды в условиях микрогравитации. Провести проверку математической модели на основе обработанных данных экспериментов по пропитке пористой среды в процессе параболических полётов.

- Исследовать особенности течения жидкости сквозь пористую среду, содержащую неоднородности проницаемости в условиях микрогравитации.

- Исследовать влияние инерциальных эффектов в уравнении баланса импульса на динамику пропитки высокопроницаемой пористой среды в условиях микрогравитации.

- Разработать математическую модель и программный код для описания процесса пропитки натуральной пористой среды в условиях микрогравитации с учётом дополнительных потоковых членов, связанных с размытием фронта за счёт неустойчивости при капиллярной пропитке.

- Исследовать влияние типа смачиваемости среды на процесс вытеснения вязкой жидкости из пористой среды под действием перепада давления.
- Разработать математическую модель и программный код для описания процесса неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористого пласта, содержащего области повышенной проницаемости.
- Исследовать влияние наличия и ориентации трещины гидроразрыва пласта на динамику вытеснения нефти.
- Исследовать влияние определяющих параметров на процесс очистки трещины от жидкости гидроразрыва перед введением в эксплуатацию.

Научная новизна

В диссертационной работе впервые получены следующие результаты:

1. Впервые с использованием метода, запатентованного автором с соавторами, были разработаны математические модели и алгоритмы моделирования на макроуровне с учётом возможных процессов на микроуровне, а именно, неустойчивости, возникающей на фронте вытеснения углеводорода из пласта, что оказывает существенное влияние на результат моделирования, особенно при протекании химических реакций. Помимо этого, моделирование нелинейных процессов вытеснения углеводородов, учитывающее возникающую неустойчивость фронта на мелком масштабе, было рассмотрено с учётом химических взаимодействий между фазами и с учётом понижения вязкости нефти в результате экзотермических химических реакций.
2. На основе экспериментального базиса подобраны эмпирические константы для математических моделей, описывающих неустойчивое многофазное течение в пористой среде.
3. Предложен новый метод вычисления площади нерегулярных изоповерхностей.
4. Описаны особенности многократной пропитки пористой среды, содержащей неоднородности, в условиях микрогравитации.
5. Разработана математическая модель, описывающая капиллярную пропитку пористой среды в условиях микрогравитации, которая учитывает размытие фронта вытеснения не только за счет диффузии и дисперсии, но и за счёт неустойчивости поверхности раздела фаз.
6. Введен новый безразмерный критерий, характеризующий соотношение вынужденной конвекции и дисперсии за счет капиллярных сил, показывающий, при каких условиях необходим учёт капиллярного давления и типа смачиваемости среды при моделировании фильтрационных процессов.

7. Показана роль инерционных эффектов при течении вязкой жидкости в пористой среде, содержащей неоднородности проницаемости.

8. Показано, что трещина гидроразрыва пласта лишь интенсифицирует нефтедобычу, но не увеличивает коэффициент извлечения нефти.

9. В случае, когда жидкость гидроразрыва имеет более высокую вязкость, чем вытесняющий агент, возможно, что при очистке трещины прорыв нефти произойдет около скважины, а не через трещину. То есть трещина гидроразрыва пласта оказывается не полностью подключенной к процессу сбора нефти.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе получены новые математические модели, уточняющие учёт капиллярных эффектов, химических взаимодействий между фазами, неоднородности пористости и проницаемости, а также подсеточную неустойчивость. Применимость построенных моделей подтверждена сравнением с экспериментальными данными. Такие математические модели могут лечь в основу цифровых двойников месторождений, расчёты на основе данных моделей помогут сделать выводы о целесообразности применения тех или иных методов увеличения нефтеотдачи на месторождениях с конкретными характеристиками. Изучение течения жидкостей под действием капиллярных сил поможет спрогнозировать поведение жидкостей в условиях микрогравитации, что является практически значимым для развития космических технологий. Проведение натурных экспериментов в условиях микрогравитации является дорогостоящим и трудозатратным, что повышает значимость численных экспериментов. Кроме того, фильтрационные течения в пористых средах как в условиях микрогравитации, так и в земных условиях трудно визуализируются, поэтому, чтобы понять особенности процесса фильтрации необходимо использовать максимально детальные математические модели, учитывающие различные дополнительные факторы.

Методология и методы исследования.

– Моделирование фильтрационных процессов проводилось на основе моделей механики многофазных сред.

– Математические модели и программные коды были проверены на базе лабораторных экспериментов с искусственной и натуральной пористой средой.

– Учёт неустойчивости фронта вытеснения при крупномасштабном моделировании осуществлялся на основе метода, запатентованного автором диссертации с соавторами (№2670174 Способ многомасштабного моделирования нелинейных процессов подземной гидродинамики)

Положения, выносимые на защиту

1. Реализованный в диссертации метод для многомасштабного моделирования нелинейных процессов подземной гидродинамики позволяет учитывать процессы, происходящие на микроуровне, при моделировании на макроуровне путём добавления дополнительных потоковых членов в определяющую систему уравнений, а также позволяет моделировать химические взаимодействия между фазами с учётом гидродинамической неустойчивости и увеличения площади межфазного контакта.

2. Предложенный в диссертации метод определения площади нерегулярной изоповерхности контакта фаз, обработка результатов вычислительных параметрических исследований и полученные функциональные формы для определения коэффициентов, отвечающих за размытие фронта за счёт неустойчивости вытеснения на мелком масштабе, позволили показать, что размытие фронта вытеснения существенно интенсифицирует химические реакции и ускоряет процесс вытеснения.

3. Инерционные члены в уравнении баланса импульса существенно влияют на динамику капиллярной пропитки пористой среды, когда новый параметр, выражающий соотношение «характерного времени инерции при фильтрационных процессах» и характерного времени капиллярной пропитки превосходит единицу. Тип смачиваемости среды необходимо учитывать, когда безразмерный критерий, характеризующий соотношение вынужденной и капиллярной конвекции, уменьшается ниже некоторого критического значения.

4. В коротких трещинах гидроразрыва процесс очистки трещины идет быстрее и процесс фильтрации происходит более равномерно. В случае, когда жидкость гидроразрыва имеет более высокую вязкость, чем вытесняющий агент, возможно, что при очистке прорыв нефти произойдет около скважины, а не через трещину. То есть трещина гидроразрыва пласта оказывается не полностью подключенной к процессу сбора нефти. Трещина гидроразрыва пласта лишь интенсифицирует нефтедобычу, но не увеличивает коэффициент извлечения нефти.

Достоверность результатов.

Обоснованность полученных результатов следует из корректности постановок задач, использования основных уравнений для многофазного течения, основных законов сохранения (массы, количества движения и энергии), граничных условий, а также применения апробированных численных методов. Достоверность результатов подтверждается сравнением теоретических результатов с экспериментальными данными.

Апробация работы.

Основные результаты докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях и семинарах: Ломоносовские чтения - 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, г. Москва, Россия; Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», г. Сургут, Россия, 2016; Всероссийская научная конференция «Цифровая модель керна», г. Москва, Россия, 2017; The ISRM Commission on Rock Dynamics Workshop (ISRM-CRD2017), г. Пекин, Китай, 2017; International Astronautical Congress 2017 (г. Аделаида, Австралия), 2018 (г. Бремен, Германия), 2020(CyberSpace Edition), 2021 (г. Дубай, О.А.Э.); I-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов "Технологии будущего нефтедобывающих регионов", г. Сургут, Россия, 2018; XVII Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование», г. Саров, Россия, 2018; IAA SciTech Forum, г. Москва, Россия, 2018; VI Международная Конференция "Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям, Москва, Россия, 2018; Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», г. Обнинск, Россия, 2019; Цифровые технологии в разработке месторождений: геомеханические задачи и моделирование ГРП, г. Уфа, Россия, 2019; International Summer School – Conference Advanced Problems in Mechanics, г. Санкт-Петербург, Россия, 2019, 2020, 2021; XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Уфа, Россия, 2019; VII-я Всероссийская конференция с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения», г. Пермь, Россия, 2020; Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2020», Москва, Россия, 10-27 ноября 2020; Международная конференция «Математические идеи П. Л. Чебышёва и их приложения к современным проблемам естествознания», г. Обнинск, Россия, 2021; Симпозиум IAA «Безопасность Космических полетов», г. Санкт-Петербург, Россия, 2021, 2022; XVI Минский международный форум по тепломассообмену, г. Минск, Беларусь, 2022; XVI Всероссийский симпозиум по горению и взрыву, г. Суздаль, Россия, 2022; Non-linear phenomena and dynamics of flame propagation: theoretical aspects and implementations, г. Боровое (Бурабай), Казахстан, 2022; 2nd Global Summit and Expo on Aerospace and Mechanical Engineering (GSEAME2022), г. Дубай, О.А.Э., 2022; Научно-исследовательский семинар кафедры газовой и волновой динамики, МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, 2022; Научно-исследовательский семинар кафедры аэромеханики и газовой динамики, МГУ имени М.В.

Ломоносова, г. Москва, Россия, 2022; Семинар по механике сплошных сред под руководством А.Г. Куликовского, В.П. Карликова, О.Э. Мельника и А.Н. Осипцова, МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, 2023. Кроме того, на основании данных результатов успешно защищена при окончании аспирантуры научно-квалификационная работа на тему: «Некоторые задачи многофазных фильтрационных течений».

Публикации по теме диссертации.

Основные результаты, представленные в диссертации, изложены в 21 научной статье [1-21], из них 11 опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus, RSCI [1-11]. Также по материалам диссертации опубликованы 2 главы в монографиях [22, 23], 1 учебное пособие [24], получен 1 патент [25] и 2 свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение [26, 27]. Общий объём печатных работ – 29.44 п.л. (авторский вклад – 15.06 п.л.)

Личный вклад автора.

Результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором лично или в соавторстве при его непосредственном участии. Автором было получено решение всех поставленных задач и проведен анализ полученных результатов. Автором была проведена работа по подготовке статей для публикаций в научных журналах и докладов для представления на российских и международных конференциях. Личный вклад автора в статье [1] составляет 1, в работах [2-27] — 1/2.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения, одного приложения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 190 страниц с 82 рисунками и 9 таблицами. Список литературы содержит 174 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассматривается актуальность, степень разработанности, цели, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость представленного в диссертации исследования, а также положения, выносимые на защиту и оценка достоверности полученных результатов.

В **обзоре литературы** представлена соответствующая теме диссертации литература и дана оценка проработанности данной темы.

Глава 1 посвящена изучению неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды посредством менее вязкой жидкости. Представлены результаты численного моделирования вытеснения модели нефти из образца керна в сопоставлении с результатами натуральных экспериментов. Предложен метод оценки площади контакта фаз и проведено исследование влияния различных параметров на эволюцию площади поверхности межфазной границы. Также предложен метод, позволяющий учесть подсеточную (мелкомасштабную неустойчивость) при моделировании на крупном масштабе. Такой метод позволяет учесть неустойчивость вытеснения даже при одномерном моделировании. Предложена математическая модель для моделирования процесса нефтедобычи термогазовым методом, когда между фильтрующимися флюидами происходят химические реакции, приведены результаты серии численных экспериментов для исследования эффективности термогазового метода и влияния учета возрастания площади контакта фаз.

В **разделе 1.1** описана математическая модель и численный метод, применяемые для моделирования процесса неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды. Рассматривается трехмерная область в виде прямоугольного параллелепипеда. Математическая модель содержит уравнение баланса массы, уравнение баланса импульса в форме закона Дарси. Учитывается капиллярное давление, рассчитываемое по модели Леверетта, а также относительные фазовые проницаемости, рассчитываемые по модели Брукса-Кори. На боковых стенках ставятся условия непроницаемости, на входном и выходном сечении ставится либо условие постоянного перепада давления, либо условие постоянного объёмного расхода. Для упрощения численных процедур вводится среднее давление, в результате после преобразований получается следующее уравнение для насыщенности:

$$\varphi \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{M_1}{M_1 + M_2} u - D_C \frac{\partial s}{\partial x} \right) = 0$$

Здесь роль коэффициента диффузии играет коэффициент D_C , отвечающий за размытие фронта вытеснения из-за капиллярных сил, φ - пористость, s - насыщенность, M_i - мобильность i -ой фазы, u - скорость. При численном моделировании используется равномерная разнесенная сетка с использованием схемы «крест» для дискретизации; для решения систем линейных уравнений используется метод Vi -CGStab. Схема для насыщенности стабилизируется добавлением искусственной диффузии к ее коэффициентам, а 2ой порядок точности достигается вычитанием искусственной антидиффузии. Производные по времени рассчитываются по явной схеме.

Раздел 1.2 посвящён описанию экспериментов по вытеснению модели нефти из образца керна (неокомский песчаник). Было проведено 4 эксперимента, в качестве модели нефти использовалось масло или керосин, при

этом в эксперименте поддерживался либо при постоянный перепад давления на входе и выходе из образца, либо постоянный расход жидкости на входе. В **разделе 1.3** приводится сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных (рис. 1). Параметры каждого расчёта соответствовали эксперименту, при этом эмпирические константы в моделях Леверетта и Брукса-Кори подбирались таким образом, чтобы результат численного расчёта максимально соответствовал экспериментальным данным.

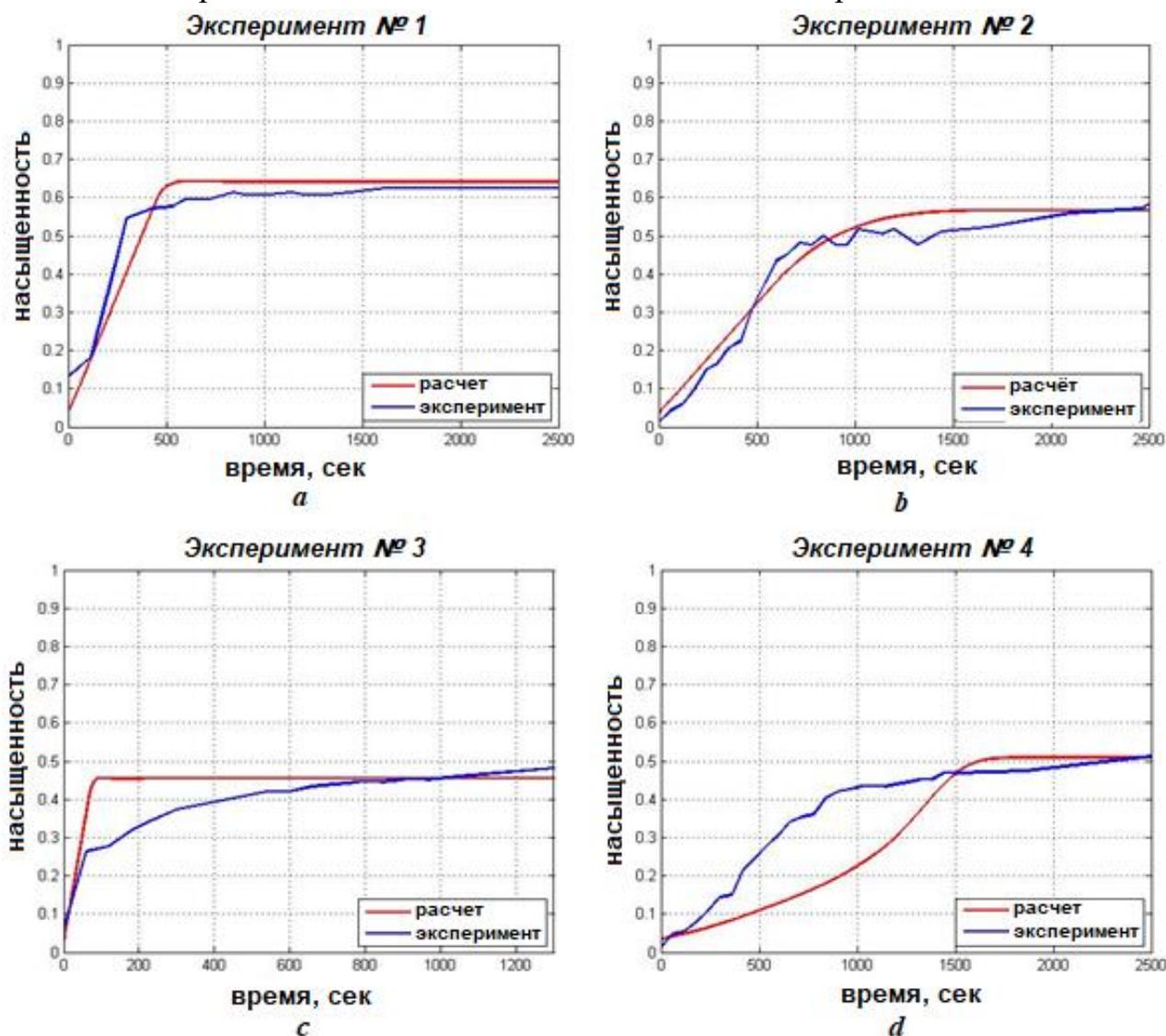


Рис.1. Сопоставление результатов численного моделирования с результатами экспериментов по вытеснению модели нефти из некоомских песчаников: насыщенность вытесняющей жидкости в образце в зависимости от времени (Эксп. №1 – керосин вытесняется водой при постоянном объёмном расходе, Эксп. №2 –масло вытесняется водой при постоянном объёмном расходе, Эксп. №3 –керосин вытесняется водой при постоянном перепаде давления, Эксп. №4 –масло вытесняется водой при постоянном перепаде давления)

В **разделе 1.4** предлагается метод оценки площади межфазной границы для численных расчётов, в которых граница между фазами не отслеживается явно. Метод подразумевает оценку площади изоповерхности насыщенности на кубической сетке. Сама площадь определяется формулой $|\Sigma| = \sum_m W(\delta_m)h^2$, где $W(\delta_m)$ – весовая функция, зависящая от целого числа $\delta_m = 0, 1, \dots, 7, 8$; h – размер кубической ячейки. Физический смысл весовой функции – среднее значение площади поверхности, отсекающей δ_m вершин кубической ячейки, деленная на площадь грани ячейки. Функцию $W(\delta_m)$ можно определить калибровкой на известных фигурах. Калибровка проводилась на модифицированных цилиндрах, у которых плоские торцы заменены полушариями. С помощью предложенного метода была рассмотрена эволюция площади поверхности раздела фаз в расчётах, соответствующих экспериментам из разделов 1.2, 1.3, площадь подсчитывалась в каждый расчётный момент времени. Также исследовано влияние различных параметров на изменение площади в процессе вытеснения (рис.2).

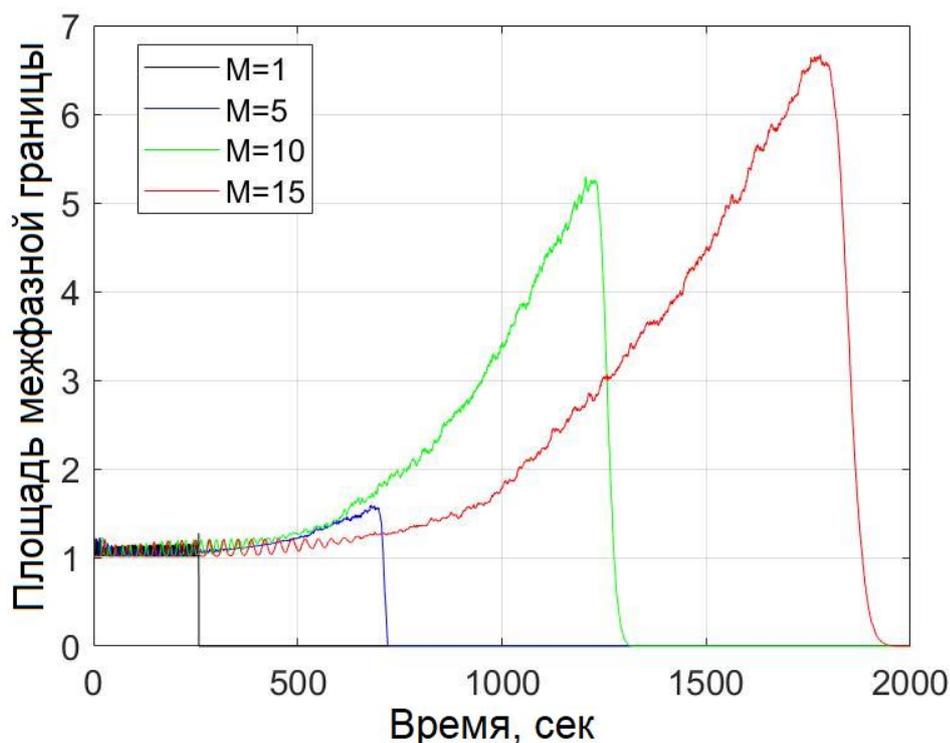


Рис.2. Эволюция площади поверхности границы раздела фаз (по отношению к площади поперечного сечения расчётной области) для различных значений отношения вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей M .

В **разделе 1.5** предлагается метод учёта подсеточной неустойчивости при моделировании процесса вытеснения на макроуровне. Суть метода заключается в том, что сначала проводится серия расчётов на мелком масштабе, затем

проводится осреднение полученных результатов, на основании которых, формируются таблицы значений коэффициентов, позволяющих охарактеризовать размер зоны смещения и учесть мелкомасштабную неустойчивость при перемасштабировании. При моделировании на крупном масштабе используются уравнения с дополнительными корректирующими потоковыми членами:

$$\frac{\partial \rho_k s_k \varphi}{\partial t} + \nabla (\rho_k s_k v + \rho_k s_k F_k(s, M, Pe) v - \rho D(s, v, M, Pe) \nabla s_k) = 0$$

Где коэффициенты F_j , D связаны с размытием фронта за счёт неустойчивости и диффузии, ρ_k - истинная плотность k -ой фазы, v - средняя скорость, $\rho = \sum_k \rho_k s_k$ - средняя плотность. В **разделе 1.6.** рассматривается вытеснение вязкой жидкости из пористой среды с учётом химических взаимодействий между фазами, а именно, рассматривается термогазовый метод нефтедобычи. Моделирование проводится на основании метода, предложенного в разделе 1.5, который позволяет учесть неустойчивость вытеснения даже при одномерном моделировании. Рассматривается трехфазный поток в поровом пространстве, учитываются межфазные переходы за счёт химических реакций. Скорость химической реакции зависит от площади контакта фаз, поэтому при моделировании скорости реакции также учитываются коэффициенты связанные с неустойчивостью вытеснения. Предложена аппроксимационная функциональная форма, приближающая значения коэффициентов F_j и D из раздела 1.5. Химическая реакция подразумевается экзотермической, что приводит к уменьшению вязкости углеводорода. Математическая модель для описания процесса основана на модифицированном уравнении баланса массы, уравнении баланса импульса в форме закона Дарси, уравнениях баланса энергии для неподвижного скелета и фильтрующегося флюида, капиллярное давление не учитывается. В результате проведения серии численных экспериментов показано, что процесс вытеснения протекает быстрее, если учитывать дополнительные факторы, связанные с неустойчивостью и диффузией. Показано, что как при наличии подсеточной неустойчивости, так и без нее процесс вытеснения при экзотермической химической реакции происходит значительно быстрее, что доказывает эффективность использования термогазового метода для повышения нефтеотдачи.

В **разделе 1.7** представлены выводы к Главе 1.

Глава 2 посвящена изучению течения жидкостей сквозь пористую среду в условиях микрогравитации. В условиях сниженной гравитации основной движущей силой для жидкости оказывается капиллярное давление, поэтому экспериментальные исследования поведения жидкости в условиях

микрогравитации позволяет провести качественное изучение капиллярных эффектов. В главе описаны два вида экспериментов: во время параболических полётов самолёта и эксперименты на околоземной орбите. Приводятся результаты обработки экспериментальных данных, предлагаются математические модели для описания капиллярной пропитки, результаты расчётов сопоставляются с результатами экспериментов. Также проводится анализ того, в каких случаях необходимо учитывать капиллярное давление.

Раздел 2.1 посвящён обработке экспериментальных данных по пропитке искусственной пористой среды во время параболических полётов. Эксперименты по просачиванию смачивающей жидкости (воды) рассматривались в искусственной пористой среде, состоящей из стеклянных сфер, такая среда позволяет легко визуализировать процесс течения, кроме того даёт возможность организовать в экспериментальной ячейке зоны с различной проницаемостью путём насыпки шариков с различным диаметром. В работе рассматриваются три возможные конфигурации насыпки шариков: 1) однородная среда; 2) два слоя шариков с различными проницаемостями; 3) насыпка одинаковых шариков со вставкой другой проницаемости; При обработке экспериментальных данных на каждый кадр накладывались специальные фильтры для придания изображению контрастности и лучшей визуализации фронта пропитки, затем положение фронта пропитки фиксировалось в различных сечениях. При пропитке также наблюдалась неустойчивость, но отличная от неустойчивости Саффмана-Тейлора, такую неустойчивость можно назвать «капиллярной». В результате обработки экспериментальных данных были получены графики, показывающие зависимость положения фронта пропитки от времени для нескольких последовательных парабол, совершенных самолётом, для различных конфигураций укладки шариков. **Раздел 2.2** посвящён математическому моделированию процесса многократной пропитки пористой среды в условиях микрогравитации. Как показала обработка экспериментальных данных в разделе 2.1, с каждой последующей параболой жидкость поднимается на большую высоту, то есть пропитка происходит интенсивнее в уже смоченной пористой среде. Для моделирования такого явления необходимо применять специальные математические модели с учётом гистерезиса, в данном случае при моделировании относительной проницаемости пористой среды остаточная насыщенность зависела от максимальной насыщенности во время предыдущей параболы. Математическая модель основана на классическом уравнении баланса массы и уравнении баланса импульса в форме закона Дарси с учётом массовой силы (значение g при численном моделировании использовалось из данных записанных акселерометром на борту самолёта во время проведения

эксперимента), при этом учитывалось капиллярное давление, за счёт которого происходило течение, а внешний перепад давления на входе и выходе из расчётной области полагался равным нулю. В **разделе 2.3** приводится сопоставление результатов расчётов с экспериментальными данными. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментом (рис.3).

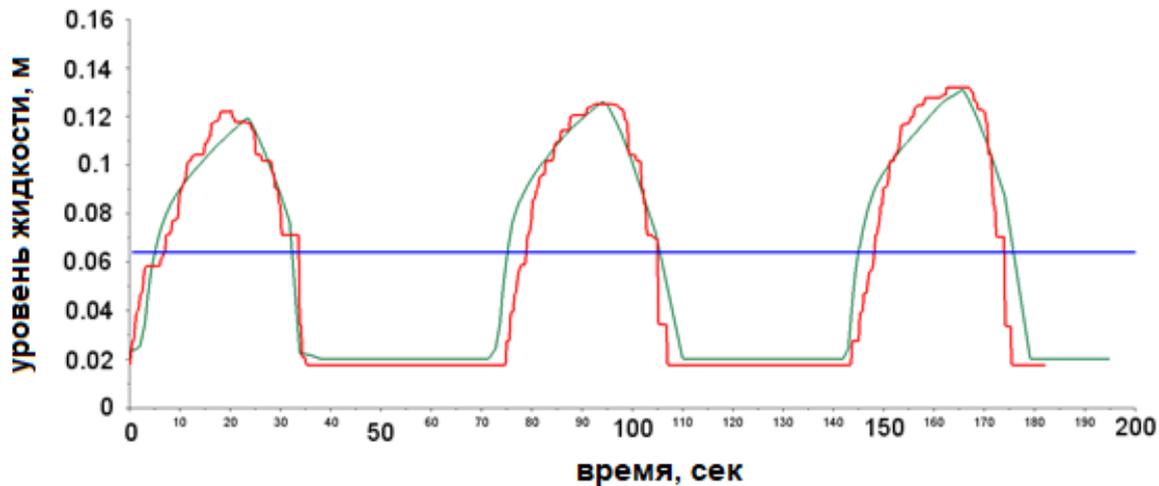


Рис.3. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Красная кривая – экспериментальные данные, зелёная кривая – результат численного моделирования, синяя линия – граница раздела областей с различной проницаемостью

В **разделе 2.4** проводится исследование влияния учёта нестационарного члена в уравнении баланса импульса на динамику пропитки. Классический закон Дарси получается при отбрасывании инерционных членов в уравнении баланса импульса, в данном разделе рассматривается модифицированный закон Дарси, в котором присутствует нестационарный член:

$$u_{k,i} + T_k \frac{K_k^R}{s_k} \frac{\partial u_{k,i}}{\partial t} = - \frac{K_0 K_k^R}{\mu_k} \frac{\partial p_k}{\partial x_i}$$

Где $u_{k,i}$ – i -ая компонента скорости фильтрации k -ой фазы, p_k – давление в k -ой фазе, K_0 – абсолютная проницаемость пористой среды, K_k^R – относительная фазовая проницаемость k -ой фазы, μ_k – динамическая вязкость k -ой фазы, $T_k = \frac{K_0 \rho_k}{\varphi \mu_k}$ – характерное время инерции, коэффициент имеющий размерность времени. В случае, когда рассматривается высокопроницаемая пористая среда и маловязкая жидкость, учёт этого члена может оказывать влияние на результат расчётов. Численный эксперимент показал, что учёт этого члена влияет на картину пропитки на начальном этапе, а также при

прохождении границы раздела пористых сред с различными проницаемостями (рис.4)

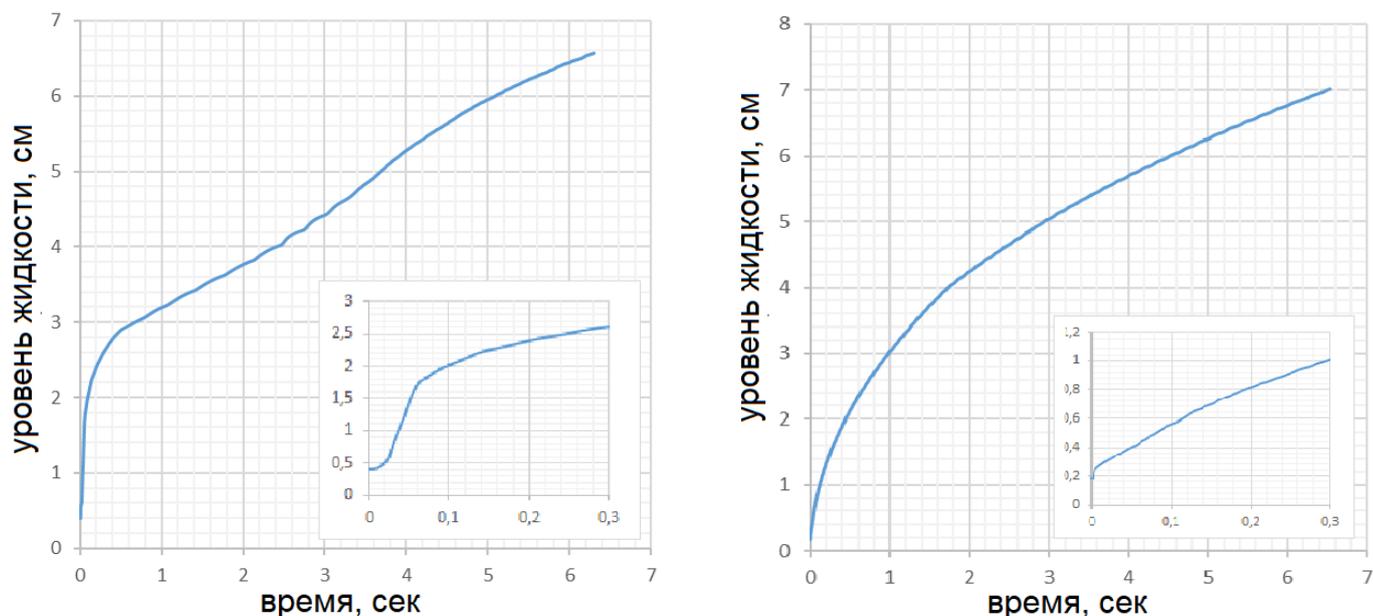


Рис.4. Результат расчёта с учётом инерционных эффектов(слева) и без учёта инерционных эффектов(справа).

В **разделе 2.5** приводится описание экспериментов по пропитке натуральной пористой среды на околоземной орбите. Фильтрация наблюдалась в трех цилиндрических образцах с одинаковой пористой средой: смесь каолинита и кварцевого песка. Жидкости, движущиеся в каждой из трех ячеек, были: сырая нефть, смазочное масло и раствор полимера в дистиллированной воде. Уровень жидкости в почве регистрировался с помощью волоконно-оптических датчиков, расположенных вдоль длины образца (каждый датчик фиксировал время, когда жидкость его достигла). Результаты эксперимента показали неравномерность пропитки: датчики, находящиеся на большей высоте, срабатывали раньше датчиков, расположенных на меньшей высоте.

Раздел 2.6 посвящён математическому моделированию такой капиллярной пропитки, основанному на уравнении конвекции-диффузии:

$$\varphi \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(F_L - D \frac{\partial s}{\partial x} + F_0 ((s - s_{min})(s_{max} - s))^\alpha \right) = 0$$

F_L - поток конвекции. В уравнении присутствует дополнительный потоковый член пропорциональный коэффициенту F_0 . Этот потоковый член позволяет моделировать эффект неравномерности фронта пропитки, показанный в разделе 2.5 за счёт размытия фронта пропитки. В **разделе 2.7** приводится сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными для исследования пропитки на околоземной орбите (рис.5). Коэффициенты в математической модели, отвечающие за размытие фронта, выбирались на основе экспериментальных данных.

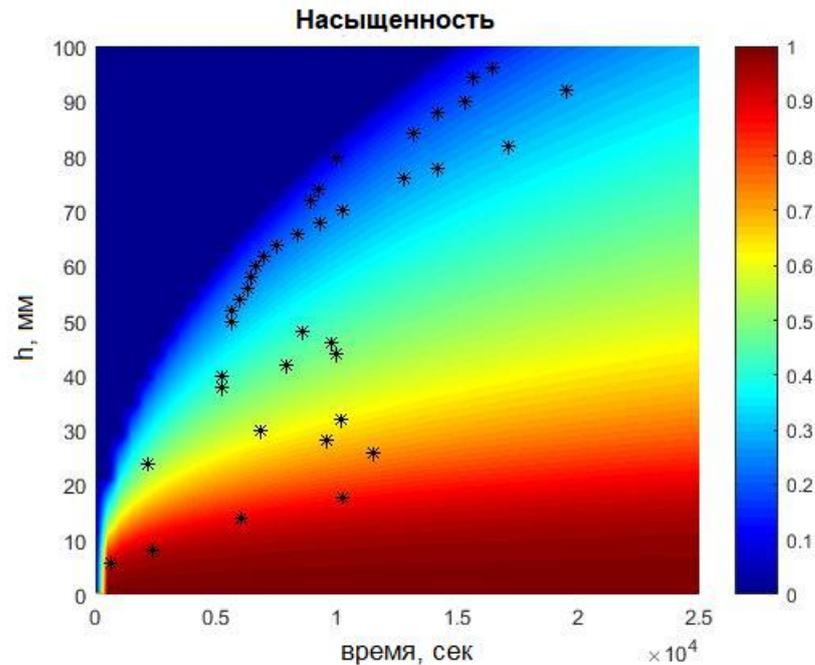


Рис.5. Сопоставление распределения насыщенности в результате численного моделирования с данными эксперимента по пропитке пористой среды раствором полимера (чёрные маркеры)

Раздел 2.8 посвящён исследованию влияния капиллярных эффектов на двухфазную фильтрацию. Проведён ряд численных экспериментов, когда помимо капиллярного давления присутствует внешний перепад давления, при этом варьировалась величина капиллярного давления и тип смачиваемости среды (то есть направление капиллярной силы). Показано, что, начиная с некоторого значения величины капиллярного давления, тип смачиваемости среды не влияет на динамику фильтрации. Введён безразмерный параметр, характеризующий отношение вынужденной и капиллярной пропитки: $\alpha = \frac{\Delta P \cdot \sqrt{K_0} \cdot 0.5^{1+a_j} \cdot n_G \cdot \mu_G}{\mu_o \cdot C_j \cdot a_j \cdot \cos \theta \cdot \sigma \cdot \sqrt{\phi} \cdot k_G}$. ΔP - перепад давления, C_j и a_j - константы в модели Леверетта, n_G и k_G константы в модели Брукса-Кори, θ - угол смачивания, σ - коэффициент поверхностного натяжения. При превышении критического значения параметра α , капиллярное давление в расчёте можно не учитывать.

Раздел 2.9 содержит выводы к Главе 2.

Глава 3 посвящена вычислительному исследованию влияния области повышенной пористости и проницаемости на вытеснение нефти из модельного коллектора. Нефтедержащий пористый пласт может содержать как естественные неоднородности проницаемости, так и искусственно созданные (трещина гидроразрыва пласта). В данной главе рассмотрено, как наличие возле добывающей скважины зоны повышенной пористости и проницаемости, влияет на динамику неустойчивого вытеснения нефти, а также влияние различных факторов на процесс очистки трещины ГРП, смоделированной как область повышенной пористости и проницаемости. **Раздел 3.1** посвящён

математической модели: рассматривается двумерная область, в которой расположена одна (или четыре) нагнетательных скважины и одна добывающая, возле которой могут располагаться области повышенной пористости и проницаемости. Моделирование проводится на основе классического уравнения баланса массы и уравнения баланса импульса в форме закона Дарси. Внешние границы считаются непроницаемыми, на скважинах задано постоянное давление. **Раздел 3.2** посвящен описанию численного метода. Задача решается на равномерной сетке. Для дискретизации уравнения на насыщенность используется 9-точечный шаблон. Для стабилизации схемы используется метод TVD на основе модификации коэффициентов уравнения с учетом многомерного ограничителя потоков по Кузьмину.

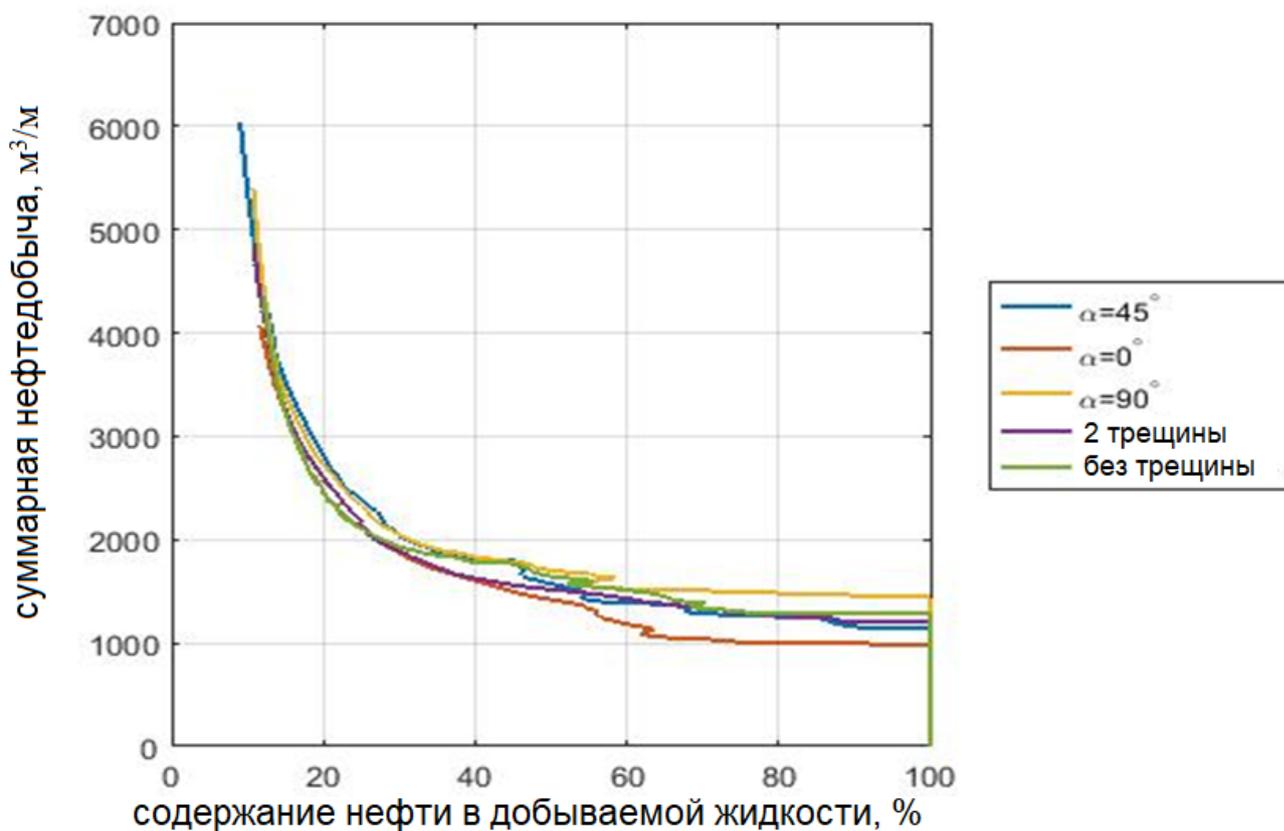


Рис.6. Результаты численного моделирования. Зависимость суммарной нефтедобычи (на метр высоты пласта) от содержания нефти в добываемой жидкости. Зелёная кривая: область повышенной пористости и проницаемости отсутствует; фиолетовая: две области; синяя, жёлтая и оранжевая: одна область, но различное направление.

В **разделе 3.3** приводятся результаты вычислений. Показано, что наличие области повышенной пористости и проницаемости ускоряет вытеснение нефти, при этом суммарное количество добытой нефти не изменяется. Таким образом, область повышенной пористости и проницаемости не приводит к увеличению нефтеотдачи пласта, а лишь интенсифицирует процесс нефтедобычи (рис.6). На

начальном этапе эксплуатации месторождения выгоднее добывать нефть при наличии одной или двух областей повышенной пористости и проницаемости. Содержание нефти в извлекаемой жидкости значительно не отличается в случае наличия одной или двух областей, но оно падает быстрее, чем в случае отсутствия области повышенной пористости и проницаемости.

Раздел 3.4 содержит исследование процесса очистки трещины гидроразрыва пласта, которая представлена в модели как область повышенной пористости и проницаемости. Подразумевается, что при производстве трещины гидроразрыва пласта, жидкость гидроразрыва проникла в пласт. Рассматривается процесс вытеснения нефтью жидкости гидроразрыва, имеющей большую вязкость, чем нефть. Поэтому на границе раздела фаз развивается неустойчивость Саффмана-Тейлора. Показано, что в малых трещинах гидроразрыва процесс очистки трещины идет быстрее и процесс фильтрации происходит более равномерно. В случае, когда жидкость гидроразрыва имеет более высокую вязкость, чем вытесняющий агент, возможно, что прорыв нефти произойдет около скважины, а не через трещину (рис.7). То есть трещина гидроразрыва пласта оказывается не полностью подключенной к процессу фильтрации.

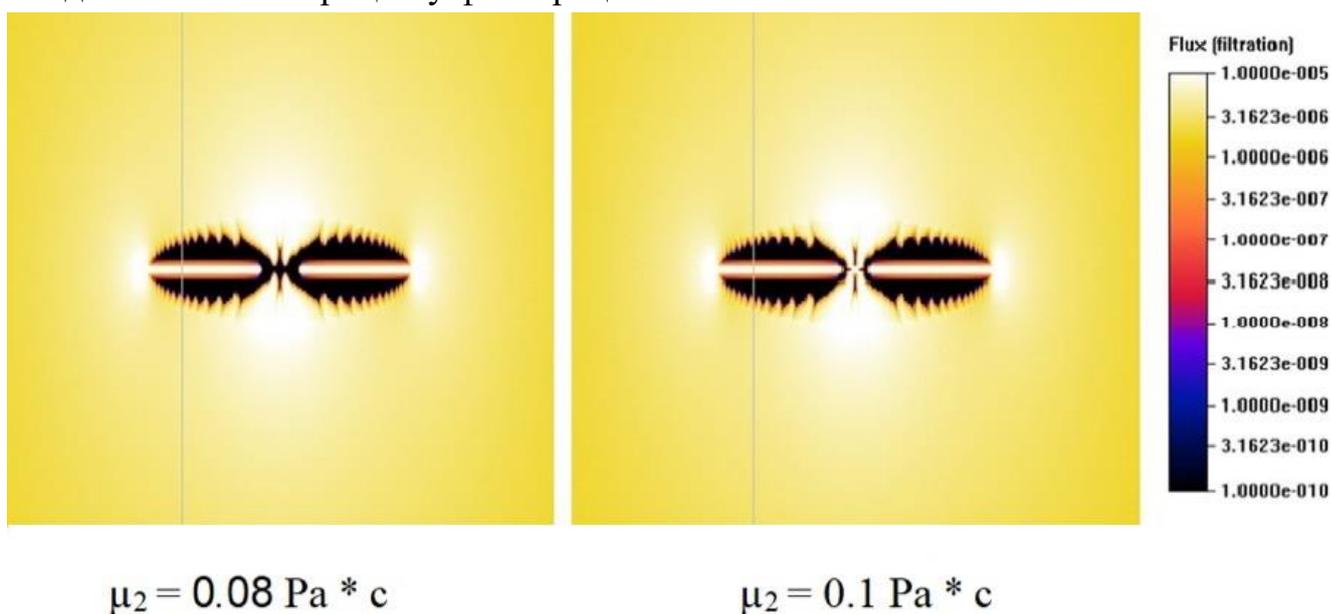


Рис.7. Картина вытеснения жидкости гидроразрыва. Для более вязкой жидкости (справа), прорыв происходит через скважину.

Раздел 3.5 содержит выводы к Главе 3.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, которые отражены в положениях, выносимых на защиту

Приложение содержит анализ определяющих уравнений, описывающих фильтрацию, в безразмерном виде.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI:

1. Skryleva E.I. Numerical simulation of multiphase flow in a porous medium in the presence of heat and mass transfer between phases // *Heat Transfer Research*. — 2023 — том 54 — № 2 — с. 1-10 — DOI:10.1615/HeatTransRes.2022044787 (WoS, Q3, Impact Factor JCR - 1,975) (0,62 п.л./ авторский вклад 0,62 п.л.)

2. Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Коленкина (Скрылева) Е.И., Газизова Д.Р. Эволюция поверхности раздела фаз при вытеснении вязких жидкостей из пористой среды // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. — 2021 — № 56 — с. 80-93 (0,87 п.л./ авторский вклад 0,44 п.л.) (англ: Smirnov N.N., Nikitin V.F., Kolenkina E.I., Gazizova D.R. Evolution of a Phase Interface in the Displacement of Viscous Fluids from a Porous Medium // *Fluid Dynamics* — 2021 — том 3 — № 1 — с. 20-27 (WoS, Q4, Impact factor JCR–0.673) (0,5 п.л./ авторский вклад 0,25 п.л.))

3. Smirnova M.N., Nikitin V.F., Skryleva E.I., Weisman Yu. G. Capillary driven fluid flows in microgravity // *Acta Astronautica*. — 2022 — том 204 — с. 892-899 — DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.10.037 (WoS, Q1, Impact Factor - 2.954) (0,5 п.л./ авторский вклад 0,25 п.л.)

4. Smirnov Nickolay, Li Kairui, Skryleva Evgeniya, Pestov Dmitriy, Shamina Anastasia, Qi Chengzhi, Kiselev Alexey. Mathematical modeling of hydraulic fracture formation and cleaning processes // *Energies* — 2022 — том 15 — с. 1-35 (WoS, Q1, Impact Factor JCR - 3.252) (2,19 п.л./ авторский вклад 1,1 п.л.)

5. Nikitin V.F., Skryleva E.I., Weisman Yu G. Control of capillary driven fluid flows for safe operation of spacecraft fluids supply systems using artificial porous media // *Acta Astronautica* — 2021 — том 194 — с. 544-548 — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.12.009 (WoS, Q1, Impact Factor - 2.954) (0,31 п.л./ авторский вклад 0,16 п.л.)

6. Dushin V.R., Smirnov N.N., Nikitin V.F., Skryleva E.I., Weisman Y.G. Multiple capillary-driven imbibition of a porous medium under microgravity conditions: Experimental investigation and mathematical modeling // *Acta Astronautica*. — 2021 — том 193 — с. 572-578 — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.06.054 (WoS, Q1, Impact Factor - 2.954) (0,44 п.л./ авторский вклад 0,22 п.л.)

7. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Skryleva E.I. Microgravity investigation of seepage flows in porous media // *Microgravity Science and Technology* — 2019 —

том 31 — № 5 — с. 629-639 — DOI: 10.1007/s12217-019-09733-7 (WoS, Q2, Impact factor JCR– 1.845) (0,69 п.л./ авторский вклад 0,35 п.л.)

8. Dushin V.R., Nikitin V.F., Smirnov N.N., Skryleva E.I., Tyurenkova V.V. Microgravity investigation of capillary driven imbibition // Microgravity Science and Technology — 2018 — том 30 — № 4 — стр. 393-398 — DOI: 10.1007/s12217-018-9623-8 (WoS, Q2, Impact factor JCR– 1.845) (0,38 п.л./ авторский вклад 0,19 п.л.)

9. Smirnova M.N., Nikitin V.F., Skryleva E.I., Weisman Yu G. Microgravity investigation of capillary driven seepage flows in artificial porous media and natural sands // Proceedings of 72st International Astronautical Congress, Dubai, United Arab Emirates — 2021 — IAC-21,A2,2,1,x65529 (Scopus, Impact Factor SJR - 0.19) (0,44 п.л./ авторский вклад 0,22 п.л.)

10. Kolenkina(Skryleva) E.I., Nikitin V.F., Dushin V.R., Smirnov N.N., Shamina A.A., Weisman Yu G. Microgravity Investigation of Capillary-Driven Imbibition into an Inhomogeneous Porous Medium // Proceedings of 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition — 2020 — IAC-20,A2,2,3,x57771 (Scopus, Impact Factor SJR - 0.19) (0,38 п.л./ авторский вклад 0,19 п.л.)

11. Dushin V.R., Skryleva E.I., Nikitin V.F. Microgravity investigation of capillary forces in imbibition of fluid into porous media // Proceedings of 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany IAC-18,A2,2,4,x44591 (Scopus, Impact Factor SJR - 0.19) (0,56 п.л./ авторский вклад 0,28 п.л.)

Другие научные труды:

12. Скрылева Е.И., Козлов И.В. Математическое моделирование и обработка эксперимента по вытеснению нефти водой из неокомских песчаников // Вестник кибернетики — 2016 — № 2 — стр. 138-145 (0,5 п.л./ авторский вклад 0,25 п.л.)

13. Душин В.Р., Никитин В.Ф., Скрылева Е.И., Макеева М.Н., Манахова А.Н. Моделирование вытеснения жидкостей из пористых сред с учетом химических взаимодействий между фазами // Успехи кибернетики — 2022 — том 3 — № 1 — с. 20-27 — DOI:10.51790/2712-9942-2022-3-1-3 (0,5 п.л./ авторский вклад 0,25 п.л.)

14. Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Скрылева Е.И., Вайсман Ю.Г. Многократная пропитка пористой среды в условиях микрогравитации: экспериментальные исследования и математическое моделирование // Успехи кибернетики. — 2022 — том 3 — № 2 — с. 24-30 (0,44 п.л./ авторский вклад 0,22 п.л.)

15. Душин В.Р., Никитин В.Ф., Скрылева Е.И. Вычислительное моделирование вытеснения флюида из пористой среды // Вестник кибернетики — 2017 — № 28 — с. 62-82 (1,31 п.л./ авторский вклад 0,66 п.л.)

16. Фахретдинова Р.Р., Душин В.Р., Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Коленкина(Скрылева) Е.И., Макеева М.Н. Вычислительное моделирование вытеснения жидкости из пористой среды с учетом наличия трещины гидроразрыва // Сборник материалов VII Всероссийской конференции с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения», посвященной памяти профессоров Г.З Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова — 2020 — с. 397-412(1 п.л./ авторский вклад 0,5 п.л.)

17. Киселев А.Б., Никитин В.Ф., Скрылева Е.И., Тюренкова В.В. Влияние трещины ГРП и взаимного расположения скважин на интенсивность и качество извлечения нефти // Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов : сб. ст. Первой междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, состоявшейся в рамках мероприятий Первого междунар. молодежного науч.-практ. форума «Нефтяная столица» — 2018 — с. 88-95 (0,5 п.л./ авторский вклад 0,25 п.л.)

18. Kolenkina(Skryleva) E.I., Smirnov N.N., Nikitin V.F., Fakhretdinova R.R., Makeeva M.N. Modeling of liquid displacement from the porous medium taking into account the presence of hydraulic fracture // сборник XLVIII International Conference “Advanced Problems in Mechanics”. APM ONLINE — 2020 (1,06 п.л./ авторский вклад 0,53 п.л.)

19. Михайлюк М.В., Тимохин П.Ю., Мальцев А.В., Никитин В.Ф., Скрылева Е.И., Тюренкова В.В. Моделирование и визуализация процесса вытеснения нефти из пористой среды // Вестник кибернетики — 2016 — том 3 — № 23 — с. 34-40 (0,44 п.л./ авторский вклад 0,22 п.л.)

20. Скрылева Е.И., Никитин В.Ф., Манахова А.Н. Моделирование процесса вытеснения нефти из пористой среды для оценки эффективности применения термогазового метода увеличения нефтеотдачи // Информационные технологии в экономике и управлении: сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции — издательство Дагестанский государственный технический университет (Махачкала) — 2022 — с. 14-17

21. Смирнов Н. Н., Никитин В. Ф., Скрылева Е. И., Фахретдинова Р. Р. Вычислительное моделирование процесса очистки трещины ГРП и процесса вытеснения нефти из области, содержащей трещину ГРП // Успехи кибернетики — 2022 — т. 3 — №11 — стр. 14–21 — DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-2

Главы в коллективных монографиях и учебные пособия

22. Смирнов Н.Н., Звягин А.В., Стамов Л.И., Никитин В.Ф., Коленкина (Скрылева) Е.И., Пестов Д.А., Шамина А.А. Цифровые технологии предсказательного моделирования в подземной гидродинамике (Монография) // издательство ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН Москва — 2021 — ISBN 978-5-93838-087-5 — 144 с. (9 п.л./ авторский вклад 4,5 п.л.)

23. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Kolenkina(Skryleva) E.I. Capillary Driven Flows under Microgravity Conditions: From Parabolic Flights to Space Experiment // сборник Preparation of Space Experiments — 2020 — ISBN 978-1-83880-340-7. — DOI: 10.5772/intechopen.93467 (1,06 п.л./ авторский вклад 0,53 п.л.)

24. Коленкина(Скрылева) Е.И., Никитин В.Ф., Логвинов О.А., Смирнов Н.Н. Фильтрационные течения в пористых средах // издательство ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН — 2020 — ISBN 978-5-93838-077-6 — 73 с. (4,56 п.л./ авторский вклад 2,28 п.л.)

Патенты и свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение

25. Бетелин В.Б., Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Стамов Л.И., Михальченко Е.В., Тюренкова В.В., Скрылева Е.И. Способ многомасштабного моделирования нелинейных процессов подземной гидродинамики // Патент №2670174 — 18 октября 2018 (1 п.л./ авторский вклад 0,5 п.л.)

26. Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Стамов Л.И., Скрылева Е.И., Тюренкова В.В., Михальченко Е.В. Программный комплекс моделирования неустойчивости вытеснения (SOFT) // свидетельство о регистрации прав на программное обеспечение №2018616762 — 2018

27. Михайлюк М.В., Тимохин П.Ю., Мальцев А.В., Никитин В.Ф., Тюренкова В.В., Скрылева Е.И. Программный комплекс визуализации результатов моделирования неустойчивого вытеснения нефти из пористых сред (ПО "Визуализатор неустойчивого вытеснения") (SOFT) // свидетельство о регистрации прав на программное обеспечение №2019615829 — 2019