

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Скрылёва 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

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор

Смирнов Николай Николаевич

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.	4
ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.	17
ГЛАВА 1. Трёхмерное моделирование неустойчивого вытеснения жидкости из пористой среды.	25
1.1. Математическая модель и численное моделирование.	30
1.2. Эксперименты по вытеснению модели нефти из неокомских песчаников.	40
1.3. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных.	43
1.4. Метод подсчёта площади границы раздела фаз.	46
1.5. Метод учёта подсеточной неустойчивости при моделировании процесса вытеснения на макроуровне.	56
1.6. Вытеснение вязкой жидкости из пористой среды с учётом химических взаимодействий между фазами.	71
1.7. Выводы к первой главе.	84
ГЛАВА 2. Исследование капиллярных эффектов при пропитке пористой среды в условиях микрогравитации.	86
2.1. Описание экспериментов по пропитке искусственной пористой среды во время параболических полётов и обработка экспериментальных данных.	89
2.2. Математическое и численное моделирование процесса многократной пропитки пористой среды в условиях микрогравитации.	104
2.3. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными для исследования пропитки во время параболических полётов.	109
2.4. Влияние инерционных членов в уравнении импульса при одномерном моделировании капиллярной пропитки.	113

2.5. Описание экспериментов по пропитке натуральной пористой среды на околоземной орбите.	116
2.6. Математическое и численное моделирование процесса пропитки неоднородной пористой среды с учётом неустойчивости поверхности раздела фаз.	118
2.7. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными для исследования пропитки на околоземной орбите.	121
2.8. Влияние капиллярных эффектов на двухфазную фильтрацию.	123
2.9. Выводы ко второй главе.	126
ГЛАВА 3. Вычислительное исследование влияния области повышенной пористости и проницаемости на вытеснение нефти из модельного коллектора	129
3.1. Математическая модель	130
3.2. Численная модель	137
3.3. Результаты вычислительного моделирования неустойчивого вытеснения нефти водой с учетом наличия трещины гидроразрыва.	143
3.4. Результаты вычислительного моделирования процесса очистки трещины гидроразрыва пласта.	150
3.5. Выводы к третьей главе.	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	159
ПРИЛОЖЕНИЕ.	165
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	172

ВВЕДЕНИЕ

1) Актуальность

Диссертация посвящена изучению особенностей многофазной фильтрации. В диссертации рассматриваются вопросы, связанные с особенностями математического и численного моделирования процесса просачивания жидкостей сквозь пористую среду. 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 видео регистрацию процесса пропитки.

В мире активно развиваются инновационные методы разработки месторождений трудно извлекаемых углеводородов. В условиях «нефтегазовой» экономики ключевая стратегическая проблема — это разработка отечественных технологий разведки и добычи нефти и газа, обеспечивающих минимально возможную стоимость единицы продукции. В процессе разработки различных стратегий повышения коэффициента извлечения нефти важную роль может играть предсказательное моделирование подземной гидродинамики с учетом внешних активных воздействий на пласт: механических, термических, химических и комбинированных.

Задача вытеснения углеводородов осложняется тем, что в практических случаях ее приходится решать на значительном пространственном масштабе. В то же время из-за использования менее вязкой воды для вытеснения более вязкой смеси углеводородов (пластовой нефти) этот процесс является неустойчивым: фронт вытеснения, даже если он был вначале плоским, искажается за счет пальцеобразных выступов, по которым менее вязкая вода прорывается к добывающей скважине, оставляя позади себя

не вытесненную нефть. После достижения одним из таких выступов добывающей скважины картина вытеснения резко меняется - большая часть подаваемой воды будет направляться в канал, созданный лидирующим пальцем. В скважину начинает закачиваться уже не нефть, а ее смесь с вытесняющей водой, причем процент воды будет быстро увеличиваться. Оставшаяся же в пласте нефть после такого прорыва будет практически неподвижна. Ещё одна сложность заключается в том, что такая неустойчивость многомасштабна, и дело ее моделирования осложняется тем, что наиболее быстро растут мелкомасштабные пальцы. Основная проблема прямого моделирования неустойчивости в том, что разрешение мелкомасштабных потоков на практически используемых сетках нереально даже с применением современной суперкомпьютерной техники. Поэтому крайне актуальна разработка алгоритмов для многомасштабного моделирования нелинейных процессов неустойчивого вытеснения в подземной гидродинамике. В случае, когда между вытесняющей и вытесняемой фазами происходят химические реакции, большое влияние на процесс начинает оказывать неустойчивость вытеснения, так как происходит увеличение площади контактной поверхности между реагирующими веществами. Поэтому важным является учёт неустойчивости (в том числе мелкомасштабной) при моделировании таких процессов.

Раздел диссертации связанный с изучением просачивания жидкостей в условиях микрогравитации является актуальным как для космических технологий, так и для земных приложений. В условиях пониженной гравитации основной движущей силой при пропитке пористой среды являются капиллярные силы. При просачивании жидкости сквозь пористую среду в земных условиях капиллярные эффекты могут оказывать значительное влияние на процесс фильтрации. При этом изучение капиллярных эффектов в условиях обычной гравитации затруднено: в крупных порах и каналах, где просачивание легко визуализируется, капиллярные эффекты недостаточно сильны и оказываются замаскированы силами гравитации; течение в мелких

порах и каналах трудно визуализируется и также подвержено влиянию гравитации. Поэтому исследование течения жидкостей под действием капиллярных сил в условиях микрогравитации, где капиллярные эффекты можно наблюдать «в чистом виде» позволяют изучить фундаментальные особенности этого явления и разработать верифицированные математические модели для более точного моделирования процесса фильтрации в том числе и в земных условиях. На космических станциях течение под действием капиллярных сил наблюдается в различных устройствах, например: тепловые трубки, устройства для подачи топлива и других жидкостей из резервуара, устройства гидропоники для выращивания растений. Проведение экспериментов в условиях микрогравитации труднодоступны и дорогостоящи, поэтому разработка математических моделей и программных пакетов для моделирования процессов течения, вызываемого капиллярными силами – крайне актуальная задача.

2) Степень разработанности темы исследования

Вопросы численного моделирования неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды рассматривались во многих исследованиях [32-38], также хорошо изучена фильтрация с учётом капиллярных эффектов [39-44], фильтрация с учётом химических реакций между фазами и внутрипластовое горение [45-54], но проблемы совместного влияния одновременно нескольких факторов до настоящего момента не исследовались. Кроме того, неразработанными остаются проблемы апскейлинга [30-31], 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 рассматривался.

3) 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 валидацию 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 с учётом 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 валидацию 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 пропитки.
- 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.

4) Научная новизна

В диссертационной работе впервые получены следующие результаты:

1. В данной работе 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 подсчёта 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.

5) Теоретическая и практическая значимость работы

В работе получены новые математические модели, валидированные на экспериментальном базисе, уточняющие учёт капиллярных эффектов, химических взаимодействий между фазами, неоднородности пористости и проницаемости, а также подсеточную неустойчивость. 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 натуральных экспериментов в условиях микрогравитации дорогостояще и трудозатратно, что делает значимой возможность проведения 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 точные математические модели, учитывающие различные дополнительные факторы.

6) Методология и методы исследования.

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

– Математические модели и программные коды были валидированы 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)

7) 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 возрастания площади поверхности контакта фаз.

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, опускается 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.

8) Достоверность результатов.

Обоснованность полученных результатов следует из корректности постановки задачи, 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 валидацией путем сравнения теоретических результатов с экспериментальными данными.

9) Апробация работы.

Основные результаты докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. Ломоносовские чтения - 2016, МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 18-27 апреля 2016

2. Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», посвященная дню рождения великого русского математика академика П.Л.Чебышева и приуроченная к 20-летию сотрудничества ОАО «Сургутнефтегаз» и компании SAP, Г. Сургут, СурГУ, Россия, 17-18 мая 2016
3. Всероссийская научная конференция «Цифровая модель керна», г. Москва, Россия, 13-17 марта 2017
4. Ломоносовские чтения - 2017, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 17-26 апреля 2017
5. The ISRM Commission on Rock Dynamics Workshop (ISRM-CRD2017), Пекин, Китай, 21-23 июля 2017
6. 68th International Astronautical Congress 2017, Аделаида, Австралия, 25-29 сентября 2017
7. I-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов "Технологии будущего нефтедобывающих регионов", г. Сургут, Россия, 8-9 февраля 2018
8. Ломоносовские чтения - 2018, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 16-27 апреля 2018
9. 69th International Astronautical Congress, Бремен, Германия, 1-5 октября 2018
10. XVII Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование», г. Саров, Россия, 15-19 октября 2018
11. IAA SciTech Forum, Москва, РУДН, Россия, 13-15 ноября 2018
12. VI Международная Конференция "Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям, Москва, Россия, 20-21 ноября 2018
13. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Механика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019
14. Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», посвященная дню рождения великого

русского математика академика П.Л. Чебышёва, г. Обнинск, Россия, 14-16 мая 2019

15. Цифровые технологии в разработке месторождений: геомеханические задачи и моделирование ГРП, Уфа, Россия, 27-28 мая 2019

16. XLVII International Summer School – Conference Advanced Problems in Mechanics, Санкт-Петербург, Россия, 24-29 июня 2019

17. XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, Россия, 19-24 августа 2019

18. XLVIII International Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics", г. Санкт-Петербург, Online, Россия, 21-26 июня 2020

19. 71st International Astronautical Congress - CyberSpace Edition, Дубай, О.А.Э., 12-14 октября 2020

20. VII-я Всероссийская конференция с международным участием «ПЕРМСКИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ», Пермь, Россия, 22-24 октября 2020

21. Ломоносовские чтения - 2020. Секция механики. Октябрь 2020 года, Москва, НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 26-30 октября 2020

22. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2020», Москва, Россия, 10-27 ноября 2020

23. Ломоносовские чтения - 2021, Москва, Россия, 20-27 апреля 2021

24. Международная конференция «Математические идеи П. Л. Чебышёва и их приложения к современным проблемам естествознания», приуроченная к 200-летию со дня рождения великого русского математика, академика П. Л. Чебышёва, г. Обнинск, Россия, 13-16 мая 2021

25. VIII Симпозиум IAA «Безопасность Космических полетов 2021», Россия, 1-4 июня 2021

26. XLIX International Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics", АРМ-2021, Санкт-Петербург, Россия, 21-25 июня 2021

27. 72nd International Astronautical Congress (IAC), Дубай, О.А.Э., 25-29 октября 2021

28. Ломоносовские чтения - 2022, Москва, Россия, 14-22 апреля 2022

29. XVI Минский международный форум по тепломассообмену., Минск, Беларусь, 16-19 мая 2022

30. XVI Всероссийский симпозиум по горению и взрыву, г. Суздаль, Россия, 4-9 сентября 2022

31. Non-linear phenomena and dynamics of flame propagation: theoretical aspects and implementations, Боровое (Бурабай), Казахстан, 25-29 сентября 2022

32. 2nd Global Summit and Expo on Aerospace and Mechanical Engineering (GSEAME2022), Дубай, О.А.Э., 17-19 октября 2022

10) Публикации по теме диссертации.

Основные результаты, представленные в диссертации, изложены в 21 научных статьях [1-21], из них 12 опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и/или Scopus[1-12]. 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].

11) 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. Основные идеи и положения работы изложены в 25 научных работах автора общим объемом 29.44 п.л. Личный вклад автора составляет 15.06 п.л.

12) 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 наименования.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.

Моделирование движения жидкости в пористых средах имеет давнюю историю. Еще в 19 веке Дарси предложил использовать простое соотношение, линейно связывающее скорость течения жидкости по тонким каналам с градиентом давления [55]. Одной из первых работ рассматривающих многофазную фильтрацию и описывающих основные уравнения баланса является [56]. В классической теории движения жидкостей и газов в пористых средах закон Дарси используется в качестве уравнения импульсов. В нашей стране известные к середине 20 века модели движения жидкостей и газов в пористой среде обобщены в монографии Лейбензона [57]. Совместное течение двух жидкостей, вытесняющих друг друга, требует уже многофазной модели фильтрации. Совместное течение двух жидкостей, вытесняющих друг друга, требует уже многофазной модели фильтрации. Обобщённый закон Дарси содержит фазовые проницаемости зависящие от насыщенностей фильтрующихся жидкостей, впервые кривые фазовых проницаемостей были экспериментально получены в работе [58]. Наиболее популярной в теории фильтрации двухфазных жидкостей является модель несмешивающегося вытеснения Бакли–Левретта [59-61], эта модель состоит из обобщённого закона Дарси и уравнений баланса массы и не учитывает капиллярное давление. Более полной моделью для описания двухфазной фильтрации является модель Рапопорта-Лиса, учитывающая скачок давления на границе фаз как функцию насыщенности [39-41]. Обобщению модели двухфазной фильтрации Рапопорта-Лиса на случай анизотропных пористых сред посвящены работы [62-65]. Существуют модели учитывающие конечное время установления равновесия фаз, и наиболее известная из них – это модель Баренблатта [66-70]. С другой стороны, многофазная модель [67] использует большое количество коэффициентов, что может быть полезно для расчета движения конкретных жидкостей со сложной реологией, но избыточно в фундаментальных исследованиях процесса вытеснения с неустойчивым фронтом, для которого желательнее использование наиболее простой модели.

В работе [71] была предложена односкоростная модель вытеснения с использованием дисперсионного потока для описания отличия скорости каждой из жидкостей от средней. Эта модель позволяет проводить расчеты без явного выделения фронта вытеснения; она же годится для описания движения смешивающихся жидкостей. Односкоростная модель явилась серьезным положительным фактором для численных исследований, поскольку искажения фронта вытеснения при неустойчивом вытеснении настолько велики, что детали фронта быстро становятся мельче ячеек расчетной сетки, если расчет ведется для практических масштабов. Величину этого измельчения пальцев для несмешивающихся жидкостей можно оценить, если ввести в модель поверхностное натяжение, как было сделано в работах [72,73]. В случае смешивающихся жидкостей возможно предсказание формы концов пальцев и возможности их расщепления [74], но не толщины, которая остается свободным параметром.

Односкоростная модель также позволяет вместо трехмерных проводить двумерные исследования. Важность двумерных исследований по вытеснению жидкостей из пористых сред объясняется тем, что такой процесс можно физически моделировать при помощи ячеек Хеле – Шоу [28, 29, 75 – 83]. В то же время одномерные расчеты вытеснения, наиболее экономичные с практической точки зрения, не могут при простом обобщении модели описать неустойчивость фронта вытеснения. Эта проблема отмечена в работе [84], в которой предложена однопараметрическая одномерная модель для ее разрешения. Эксперименты по вытеснению в ячейке Хеле-Шоу, заполненной пористым материалом рассмотрены в работах [85-87].

Существует ряд исследований, основанных на аналогии между законами гидродинамики и электротехники [88-91]. Исследование фильтрационных течений в околокритических условиях приведено в [92-94]. Существуют исследования в которых рассматриваются процессы фильтрации и вытеснения в радиальной\сферической геометрии [14,15,95] Изучению течений во фрактальных пористых средах посвящены работы [96-98].

Модели, основанные на модифицированном законе Дарси, содержащем дополнительные инерционные члены, описаны в [75, 99-103]. Другим важным фактором, влияющим на вытеснение, является неустойчивость, развивающаяся на фронте. В работе [104] впервые было показано, что фильтрационные течения в пористых средах теряют устойчивость по типу Саффмана – Тейлора. Первоначально плоская граница раздела жидкостей разрушается, некоторые «языки» воды прорываются, в результате чего возможен захват нефти в пласте. Неустойчивое вытеснение жидкости в двумерном и трехмерном случае хорошо изучено [105-108]. Возможности одномерного моделирования фильтрационных течений с учётом эффектов неустойчивости обсуждаются в [106]. Эксперименты по течению жидкости в высокопроницаемой искусственной пористой среде в условиях микрогравитации во время параболических полетов рассмотрено в [109]. Поведение границы раздела фаз при таких течениях в случае однородной пористой среды описаны в [77].

Учет капиллярных сил имеет решающее значение для описания движения жидкостей в пористых средах в случае многофазной фильтрации. В рамках изучения капиллярных эффектов проведены экспериментальные и теоретические исследования потока флюидов в пористых средах в условиях микрогравитации, разработаны математические модели, описывающие эти процессы [77, 79, 110-112]. Экспериментальные исследования фильтрационных течений в условиях Земной гравитации описаны в [113-115]. Пропитка пористой среды в условиях микрогравитации описана в работах [116,117]. Влияние эффекта гистерезиса и динамического угла смачивания на динамику течения жидкости в условиях микрогравитации рассматривается в работах [118,119]. Возможности экспериментальных исследований в условиях микрогравитации сильно ограничены, так как невозможно создать длительные периоды качественной микрогравитации в земных условиях. Проекты по проведению исследований на космической станции дорогостоящие и труднореализуемые, поэтому при изучении течения жидкости в условиях

микрогравитации приходится прибегать к численному моделированию. Аспекты численного моделирования капиллярных течений описаны в работах [42-44]. Хорошо известно, что в случае многофазных потоков граница раздела жидкостей может терять свою устойчивость, в отсутствие силы тяжести устойчивость границы раздела жидкость-газ зависит от капиллярных сил. Вопросы устойчивости течений в ячейках Хеле-Шоу и капиллярных каналах рассматриваются в работах [14,15,85,120-122]. Экспериментальные исследования потоков жидкости и поведения межфазной границы в капиллярных каналах различной формы проводилось на борту Международной космической станции [123-125]. Экспериментальные исследования просачивания жидкости через пористую среду во время параболических полётов описываются в работе [126], где пористый экран рассматривается в качестве фазового сепаратора. Учёт гравитационного расслоения фаз при многофазном просачивании сквозь пористую среду обсуждается в работах [127,128].

Экспериментальным исследованиям неустойчивости фронта вытеснения при фильтрации, сопровождаемой фазовыми переходами посвящены работы [129,130]. Вопросы горения в пористой среде рассмотрены в большом числе работ, например, в работах [45 – 51]. При этом основная масса работ посвящена либо исследованиям, проводимым в лабораторных установках с модельными пористыми средами, либо рассматриваются процессы горения пористых систем, в которых скелет является горючей фазой и участвует в реакции. Существуют работы по исследованию протекания химических реакций между реагентами, закачанными в пористый скелет [52 – 54, 169, 170].

Задаче о формировании трещины гидроразрыва посвящен ряд теоретических работ [131-138], в которых построены различные модели распространения трещины в зависимости от величины коэффициента интенсивности напряжений породы, асимптотической величины оттока жидкости через стенки трещины и реологии жидкости. В [131,132] построена

классическая модель распространения трещины в пористой среде, которая основывается на предположении малой ширины трещины по сравнению с ее длиной и высотой. Это предположение позволяет, во-первых, принять гипотезу плоского деформированного состояния для каждого сечения, перпендикулярного к линии распространения трещины, и, во-вторых, свести соотношение между шириной трещины и давлением жидкости к локальному оператору. Именно последнее предположение существенно упростило постановку задачи [131,132], что позволило широко использовать данную модель в прикладных областях нефтегазовой индустрии. В работе [133] впервые была предложена постановка плоской задачи гидроразрыва с учетом влияния прочностных характеристик на раскрытие трещины в носике. В [134] приводится дальнейшее развитие задачи о влиянии прочности породы и наличия предвестника на распространение трещины. Решение задачи о формировании трещины с учетом нелинейной реологии жидкости гидроразрыва приводится в [135] и [136]. В [137] найдены автомоделные решения задачи в случаях асимптотически малого либо большого просачивания жидкости в грунт через стенки трещины, а также для общего случая умеренного просачивания. В предельных случаях малого либо большого просачивания в качестве граничного условия на входе в трещину был задан постоянный расход (либо постоянное давление). Решение задачи в постановке [133] с учетом проницаемости среды и конечных значений коэффициента интенсивности напряжений приведено в [138]. Определены условия формирования трещин газового разрыва при закачке газа в пористую среду. Выделены основные отличия в формировании трещин и каналов при закачке газа или мало-сжимаемой жидкости [139]. Начаты исследования по определению оптимальных форм коллекторов при откачке насыщающей жидкости [140], которые пока проводятся без учета возможной неустойчивости вытеснения. Вопросы горения в пористой среде рассмотрены в работах [141-144]. Вымывание вязкой жидкости из тонкой щели исследовано в [145]. Работы [146-148] посвящены исследованию фильтрации в

трещиновато-пористых средах. Особенности течения суспензий в трещине гидроразрыва описаны в [149-155].

Вопросы связи фильтрационных характеристик пласта с данными микросейсмического мониторинга обсуждаются в [85, 156].

С развитием цифровых технологий получили распространение различные численные методы исследования фильтрационных процессов: конечно-разностные методы моделирования течений [157-160], методы, основанные на линиях тока [161,162], методы теории перколяции [163]. Возможность применения машинного обучения на экспериментальных данных для моделирования многофазных течений рассмотрена в [164, 165].

Наиболее широкое применение в России получили следующие гидродинамические симуляторы:

- 1) MORE (ROXAR);
- 2) ECLIPSE (Schlumberger);
- 3) IMEX, GEM, STARS (Computer Modeling Group Ltd);
- 4) VIP (Landmark Graphics Corporation);
- 5) LAURA (ВНИИнефть);
- 6) 3DSL (Streamsim Technologies);
- 7) tNavigator (Rock Flow Dynamics);
- 8) МКТ (TimeZYX);
- 9) TEXCXEMA (СургутНИПИнефть).

Наиболее многофункциональными программными комплексами являются ECLIPSE (Schlumberger), STARS (CMG) и tNavigator (RFD).

ECLIPSE позволяет моделировать на макроуровне сложные физико-химические эффекты, с учетом их зависимости от температуры, давления и концентрации компонентов; взаимодействие различных химических реагентов; теплообмена в системе флюид-порода; выпадение твердой фазы; эффект парогазового воздействия; внутрипластовое горение; различные виды воздействий на пласт через добывающие и нагнетательные скважины.

STARS является наиболее сложным симулятором и предназначен для моделирования фильтрационных процессов с участием трехфазных многокомпонентных систем. Он позволяет моделировать фильтрацию флюидов с дисперсными частицами или без них в коллекторах со сложным геологическим строением, в том числе пересекаемых естественными или искусственными трещинами. Он может применяться для моделирования композиционных, тепловых, геомеханических (трещинообразование, уплотнение, обрушение породы) процессов в присутствии дисперсных компонентов (полимеров, гелей, частиц породы, эмульсий, пен) или без них, а также процесса внутрипластового горения на базе суррогатной кинетики.

Пакет программ tNavigator предназначен для моделирования фильтрационных течений многокомпонентных трехфазных изотермических и неизотермических систем, реализована модель black-oil и композиционная модель. В симуляторе используется аппроксимация систем дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных объемов. В качестве метода решения рассматриваемых нелинейных уравнений используется полностью неявный метод. Имеет блок неизотермических расчетов с химическими реакциями.

На данный момент ни один из существующих симуляторов не позволяет эффективно вести расчеты при использовании мелкоячеистой адаптивной сетки с размерами локального измельчения в сантиметры, то есть невозможно исследовать пласт на микроуровне. Также указанные выше коммерческие симуляторы не позволяют эффективно рассчитывать процессы фильтрации с учетом неравновесных фазовых превращений и с учетом неравновесных химических реакций. Современные симуляторы не адаптированы для распараллеливания на супер-ЭВМ. Большинство ориентировано на использование обычных персональных компьютеров с одним процессором. В этом случае расчет всего одного варианта: а) при моделировании внутрипластового горения на сравнительно небольшой сетке, или б) расчет простой изотермической двухфазной фильтрации, но на большом

месторождении (порядка 1000 скважин) на сетке с ячейками 25 м, на ПК занимает месяцы, а на кластерных системах – недели. При проектировании или управлении разработкой, число расчётных вариантов исчисляется десятками [166,167].

Кроме того, применение зарубежных термогидросимуляторов несёт риск невозможности их использования, или совершенствования, или адаптации к иным условиям или задачам – в случае изменения геополитической обстановки и усложнения контактов с правительствами стран-разработчиков. Для освоения стратегических резервов углеводородного сырья страны такое положение неприемлемо.

Ещё одним из недостатков существующих гидродинамических симуляторов является то, что моделирование происходит на макроуровне без учета возможных процессов на микроуровне, а именно, неустойчивости, возникающей на фронте вытеснения углеводорода из пласта, что оказывает существенное влияние на результат моделирования. Программного пакета, позволяющего проводить моделирование нелинейных процессов вытеснения углеводородов с учетом возникающей неустойчивости фронта на мелком масштабе и при этом учитывающего химические взаимодействия между фазами, на данный момент нет (не считая представленных в данной диссертации разработок)

ГЛАВА 1. Трёхмерное моделирование неустойчивого вытеснения жидкости из пористой среды. ^a

Процессы разработки и эксплуатации нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений тесно связаны с закономерностями просачивания углеводородов и воды в горных породах, которые образуют продуктивные пласты. Поэтому свойства горных пород и пластовых флюидов определяют рациональную технологию разработки нефтяных и газовых месторождений и экономические показатели их извлечения из нефтяного пласта.

Результаты исследований, проведенных в данной главе, позволяют получить количественные параметры горных пород и характеристики процесса вытеснения необходимые для описания коллекторов, их классификации, характеристики связей параметров для последующей интерпретации данных и построения моделей залежи.

Основными параметрами, изучаемыми в керне нефтяных скважин, являются пористость, проницаемость горных пород, их минералогический и

^a При подготовке данной главы диссертации использовались следующие публикации автора, в которых, согласно «Положению о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова», отражены основные результаты, положения и выводы исследования: 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. — стр. 80-93; Скрылева Е.И., Козлов И.В. Математическое моделирование и обработка эксперимента по вытеснению нефти водой из неоконских песчаников // Вестник кибернетики. — 2016. — № 2. — стр. 138-145.; 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; 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. — 2022. — DOI:10.1615/HeatTransRes.2022044787; 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; 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.; 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; 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; 16. Душин В.Р., Никитин В.Ф., Скрылева Е.И. Вычислительное моделирование вытеснения флюида из пористой среды // Вестник кибернетики — 2017 — № 28 — с. 62-82; 172.

Грант РФФИ № 20-07-00378 «Моделирование неустойчивого вытеснения жидкостей из пористых сред с учетом внешних воздействий, направленных на повышение нефтеотдачи» Душин В.Р., Логвинов О.А., Скрылева Е.И., Шамина А.А., <https://istina.msu.ru/projects/341406269>;

петрографический состав, а также начальное насыщение флюидами. Кроме того, важным фактором для планирования разработки нефтяного месторождения является оценка реакции модели пласта на различные воздействия с целью увеличения нефтеотдачи. Основным способом оценки конечного коэффициента извлечения нефти на месторождении является моделирование вытеснения нефти из нефтеносной породы, измерение коэффициента извлечения, абсолютной и относительной фазовой проницаемости. Для эффективной разработки нефтяных месторождений уже на стадии проектирования важно выбрать технологию, позволяющую извлекать максимальное количество нефти, содержащейся в пласте. В настоящее время в полевой практике для увеличения коэффициента извлечения нефти часто используется технология вытеснения нефти водой. Однако не всегда понятно, как оптимизировать эту технологию для получения максимального коэффициента извлечения нефти. Поэтому изучение процессов фильтрации на моделях пласта с целью выбора наиболее эффективных технологий и агентов вытеснения нефти для конкретных термобарических условий представляет несомненный научный и практический интерес.

Одна из технологий добычи жидких углеводородов заключается в вытеснении их из пористых пластов под воздействием градиента давления. Однако, когда более вязкая жидкость (нефть) вытесняется менее вязкой (вода), вытесняющая жидкость имеет тенденцию прорываться через слой вытесняемой жидкости, образуя в нем каналы, называемые «вязкими пальцами». Результирующая неустойчивость приводит к нарушению изначально плоской границы раздела и к прорыву отдельных пальцев вытесняющей жидкости.

В результате образования и роста водяных пальцев нефть может быть захвачена внутри пористого резервуара, что значительно снижает качество вытеснения и снижает добычу нефти - более половины углеводородов может оставаться в резервуаре. С развитием неустойчивости граница раздела

жидкости искривляется, отдельные пальцы вытесняющей жидкости прорываются, и площадь границы раздела увеличивается.

Одним из наиболее эффективных методов изучения фильтрации является численный эксперимент; это намного дешевле и доступнее по сравнению с натурным экспериментом. Подготовка и проведение численного эксперимента требует меньше времени, он легко воспроизводится и дает более полную информацию. С другой стороны, численное моделирование часто является единственной возможностью, поскольку уравнения, описывающие фильтрацию, в большинстве случаев не разрешимы аналитическими и приближенными методами. В результате возникает необходимость использования вычислительной техники.

Исследование неустойчивости рассматривалось во многих работах [32-38]. Особенностью данной работы является количественная оценка развития неустойчивости. На каждом шаге по времени рассчитывается площадь поверхности раздела фаз и исследуется влияние различных параметров на изменение площади границы между вытесняемой и вытесняющей жидкостями.

Возможность расчета площади поверхности раздела фаз при трехмерном моделировании имеет большое прикладное значение. Во-первых, это позволит учесть мелкомасштабную неустойчивость, которая развивается на относительно небольших масштабах (несколько сантиметров): обычно процесс вытеснения моделируется на масштабе нефтяного месторождения (сотни метров), и когда используется крупная сетка, проблема оказывается подсеточной. В таких задачах расчет площади поверхности позволит охарактеризовать размер зоны смешения и учесть мелкомасштабную неустойчивость при перемасштабировании. Во-вторых, площадь контакта важна в случае химических реакций во время добычи нефти, например, при использовании реагентов или термогазового метода [45-54]. Размер площади поверхности смешения является критическим параметром для точного моделирования такого вытеснения, так как влияет на интенсивность процесса.

Рассмотрим механизм развития неустойчивости. Предположим, изначально граница раздела двух жидкостей была плоская. В какой-то момент времени в результате локальной флуктуации давления или скорости, возникло небольшое возмущение на поверхности раздела. Амплитуда возмущения δx (рис.1.1).



Рис.1.1. Возникновение возмущения на границе раздела.

Течение подчиняется закону Дарси (предположим отсутствие массовых сил): $u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$. Тогда в вытесняющей жидкости в окрестности возмущения изменение давления будет соответствовать величине $\delta p_1 = -\frac{\mu_1}{k} u_x \delta x$, а в вытесняемой жидкости величине $\delta p_2 = -\frac{\mu_2}{k} u_x \delta x$. Тогда при переходе через поверхность раздела между двумя жидкостями перепад давления составит $\delta p = \delta p_1 - \delta p_2 = (\mu_2 - \mu_1) \frac{u_x \delta x}{k}$.

Возможно два случая: $\mu_1 > \mu_2$ (перепад давления отрицательный) и $\mu_1 < \mu_2$ (перепад давления положительный). В первом случае возмущение будет подавлено, во втором, если сил поверхностного натяжения не хватит, чтобы скомпенсировать это локальное увеличение давления, возмущение будет расти, что приводит к развитию неустойчивости.

Теперь, для прояснения механизма потери устойчивости, два случая вытеснения $\frac{\mu_1}{\mu_2} < 1$ и $\frac{\mu_1}{\mu_2} > 1$

Предположим, что при вытеснении жидкости с вязкостью μ_2 из прямоугольной области с помощью жидкости с вязкостью μ_1 , изначально

плоская граница раздела деформировалась, и возникло небольшое возмущение.

Предположим, что $\mu_1 < \mu_2$ (рис.1.2) Выберем на границе раздела три точки: А, В и С. Ниже на графике изображены распределения давления в горизонтальных сечениях проходящих через точки А, В и С.

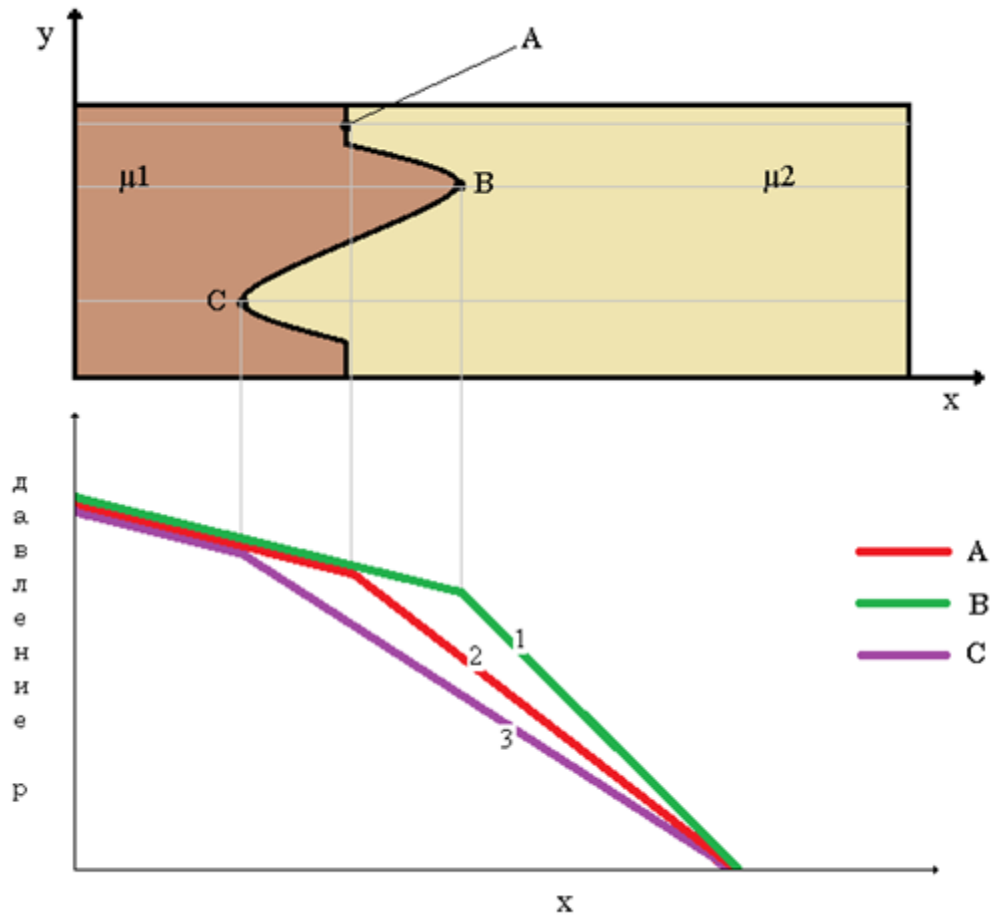


Рис.1.2. Распределения давления в различных сечениях при $\frac{\mu_1}{\mu_2} < 1$.

Согласно закону Дарси скорости на участках 1,2 и 3 равны соответственно:

$$u_1 = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_1$$

$$u_2 = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_2$$

$$u_3 = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_3$$

На графике видно, что $\frac{\partial p}{\partial x} \Big|_1 < \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_2 < \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_3$ (углы наклона прямых).

$$\text{Откуда } -\frac{\partial p}{\partial x}\Big|_1 > -\frac{\partial p}{\partial x}\Big|_2 > -\frac{\partial p}{\partial x}\Big|_3$$

Следовательно, $u_1 > u_2 > u_3$ и для этого случая возмущение будет расти.

Теперь рассмотрим случай, когда $\mu_1 > \mu_2$ (рис.1.3) и сделаем то же самое.

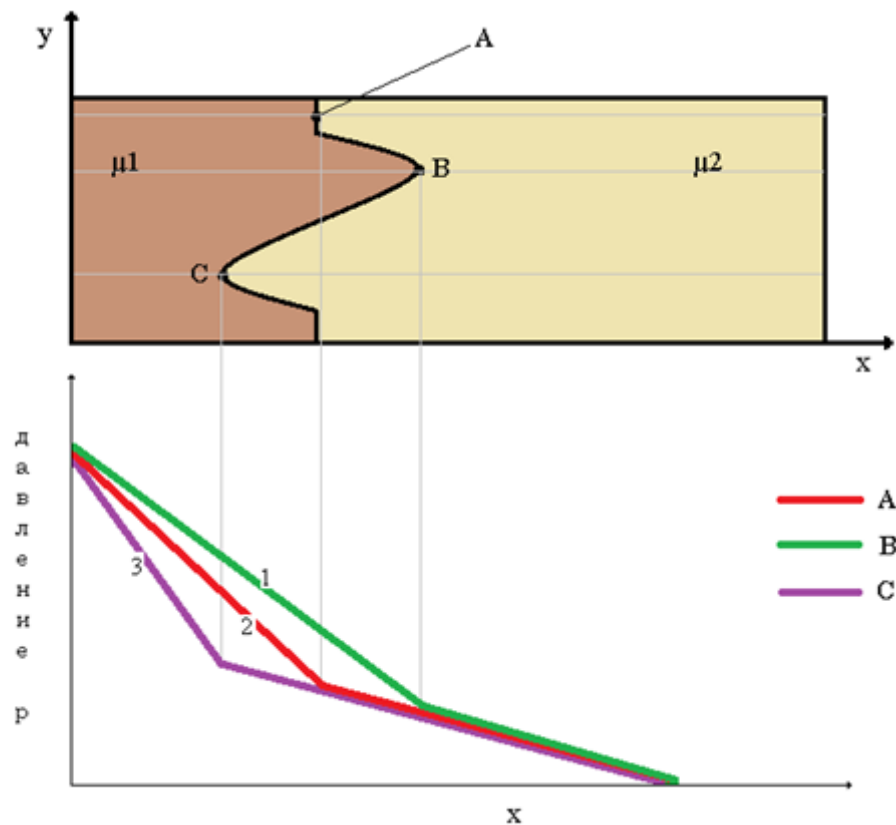


Рис.1.3. Распределения давления в различных сечениях при $\frac{\mu_1}{\mu_2} > 1$.

$$\text{В этом случае, } \frac{\partial p}{\partial x}\Big|_1 > \frac{\partial p}{\partial x}\Big|_2 > \frac{\partial p}{\partial x}\Big|_3$$

Следовательно, $u_1 < u_2 < u_3$ и когда вытесняющая жидкость более вязкая возмущение будет гаснуть.

1.1. Математическая модель и численное моделирование.

Рассматривается вытеснение вязкой жидкости («нефти») из пористой среды менее вязкой жидкостью («водой»). Область пористой среды, из которой вытесняется жидкость, имеет форму прямоугольного параллелепипеда.

Первоначально почти вся область, за исключением небольшой части вблизи секции притока, заполнена вытесняемой жидкостью. Используется следующая система: ось Ox направлена вдоль области к секции оттока. Оси Oy и Oz размещены, соответственно, по вертикали и в сторону. Вытесняющая жидкость поступает через сечение $x=0$, отток обеих жидкостей происходит через сечение $x=L$. В зависимости от режима работы программы на входе и выходе поддерживается постоянный перепад давления или расход. Боковые стенки считаются непроницаемыми. Капиллярные эффекты учитываются.

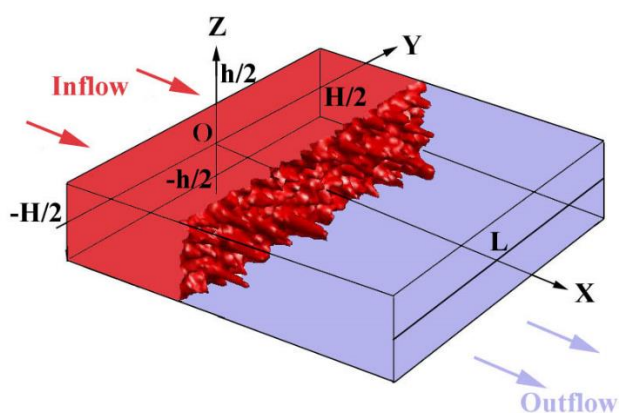


Рис. 1.4. Расчётная область.

В каждый момент времени рассчитывается насыщенность вытесняющей жидкости в каждой ячейке. Для визуализации динамики вытеснения и выделения границы двух сред выбираем некоторое значение для насыщенности s^* . После чего считаем, что граница проходит через те точки области, с одной стороны которых насыщенность больше чем заданное значение s^* , а с другой стороны меньше чем s^* . Эту поверхность будем называть границей раздела.

Пористость и проницаемость скелета зависят от пространственных координат. Вязкость каждой жидкости, поверхностное натяжение и угол смачивания считаются постоянными. Скорость жидкости достаточно мала.

Обе жидкости несжимаемые и смешивающиеся. Пористый скелет неподвижен. Температура постоянна. Межфазного массообмена нет.

В области решается следующая система уравнений:

Для каждой жидкости записывается закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \varphi s_k \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\varphi s_k \rho_k v_{k,j}) = 0 \quad (1.1)$$

Здесь φ - пористость, s - насыщенность, ρ - плотность (истинная), $v_{k,j}$ - j -я составляющая истинной скорости k -й фазы.

Скорость фильтрации $u_{k,j}$ выражается через истинную скорость $v_{k,j}$ фазы как:

$$u_{k,j} = \varphi s_k v_{k,j}$$

Среднеобъемная скорость фильтрации жидкости определяется следующим образом:

$$u_j = \sum_k u_{kj}$$

Суммирование уравнений (1.1) с учетом того, что жидкости несжимаемы и пористость не меняется со временем, приводит к:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

Закон Дарси для каждой фазы:

$$u_{k,j} = - \frac{K K_k^R}{\mu_k} \frac{\partial p_k}{\partial x_j} \quad (1.2)$$

Здесь μ_k - вязкость фазы, K_o - абсолютная проницаемость среды, K_k^R - относительная проницаемость k -ой фазы, p_k - внутрипоровое давление в фазе.

Моделирование относительных проницаемостей и капиллярного давления

Относительные проницаемости K_k^R рассчитываются с использованием модели Брукса - Кори:

$$K_k^R = \begin{cases} k_k^0 S_k^{n_k^0} & , \quad s_k \geq s_k^{res} \\ 0 & , \quad s_k < s_k^{res} \end{cases} , \quad S_k = \frac{s_k - s_k^{res}}{1 - s_1^{res} - s_2^{res}} \quad (1.3)$$

Здесь $k_k^0 > 0$ и $n_k^0 > 0$ - параметры модели, приведенные же насыщенности S_k определяются остаточными насыщенностями $0 \leq s_k^{res} \leq 1$ ($s_1^{res} + s_2^{res} < 1$). Следует заметить, что при $0 \leq S_k \leq 1$ моделируется пористая среда, пропитанная обоими флюидами; насыщение среды фазой при $s_k \leq s_k^{res}$ этой моделью не описывается. Далее будем везде полагать, что пропитка обоими флюидами имела место, и в этих условиях можно не учитывать нулевую альтернативу (1.3). Можно также заметить, что $S_2 = 1 - S_1$, и тем самым индекс «1» будем опускать далее и у приведенной насыщенности, выражая приведенную насыщенность второй фазы через первую. Для приведенной насыщенности и относительных мобильностей фаз $M_k = \frac{K_k^R}{\mu_k}$ мы имеем следующие выражения:

$$\begin{cases} S = \frac{s - s_k^{res}}{1 - s_1^{res} - s_2^{res}} \\ M_1 = \frac{k_1^0}{\mu_1} S^{n_1^0} \\ M_2 = \frac{k_2^0}{\mu_2} (1 - S)^{n_2^0} \end{cases}$$

Локально разность давлений фаз выражается через капиллярное давление p^c :

$$p_2 - p_1 = p^c(s) \quad (1.4)$$

Удобно ввести среднее давление p по аналогии со средней плотностью и скоростью фильтрации. Для этого введем дополнительную поправку к давлению $\xi(s)$ так, чтобы (1.4) было эквивалентно следующей факторизации:

$$\begin{cases} p_1 = p + \xi(s) - p^c(s)/2 \\ p_2 = p + \xi(s) + p^c(s)/2 \end{cases}$$

Определим функцию $\xi(s)$ так, чтобы закон Дарси для скорости фильтрации жидкости после суммирования уравнений (1.2) не зависел явно от $\xi(s)$ и $p^c(s)$ и имел вид:

$$u_j = -K(M_1 + M_2) \frac{\partial p}{\partial x_j}$$

Для этого необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение:

$$\frac{d\xi}{ds} = \frac{1}{2} \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} \frac{dp^c}{ds}$$

Уравнение для динамики насыщенности получим из (1.1) с учетом введенных обозначений:

$$\varphi \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{M_1}{M_1 + M_2} u_j \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_C \frac{\partial s}{\partial x_j} \right) \quad (1.5)$$

Коэффициент D_C выражается как

$$D_C = -K \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \frac{dp^c}{ds}$$

и играет роль коэффициента диффузии в уравнении (1.5), хотя физической диффузии в среде не происходит. Этот термин характеризует величину отклонения скорости фазы от среднеобъемной скорости фаз.

Капиллярное давление выражается через J-функцию Леверетта [102] и другие параметры следующим образом:

$$p^c = C_J \frac{\sigma |\cos \theta|}{\sqrt{K/\phi}} \cdot \begin{cases} S^{-a_J}, & \alpha \leq \pi/2 \\ (1-S)^{-a_J}, & \alpha > \pi/2 \end{cases}$$

где σ - поверхностное натяжение, а θ - угол смачивания.

Константы C_J и a_J в модели Леверетта могут быть определены с использованием экспериментальных данных [16].

Выражение для коэффициента диффузии D_C с учётом модели Леверетта имеет вид:

$$D_C = \frac{a_J C_J \sigma |\cos \alpha| \sqrt{K\phi}}{1 - s_1^{res} - s_2^{res}} \cdot \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \cdot \begin{cases} S^{-a_J-1}, & \alpha \leq \pi/2 \\ (1-S)^{-a_J-1}, & \alpha > \pi/2 \end{cases}$$

Начальные и граничные условия.

Начальные условия имеют особенность: для развития неустойчивости необходимо задать начальное возмущение, поэтому вблизи поверхности притока создаётся нерегулярное начальное распределение насыщенности:

$$t = 0: \quad s = \begin{cases} 0, & x \geq x_0; \\ s_\xi \cdot \xi, & x < x_0. \end{cases}$$

Здесь ξ – случайная величина, чьи значения равномерно распределены от 0 до 1, s_ξ – случайный масштабный коэффициент, который должен быть близок к нулю. При $s_\xi \rightarrow 0$ или $x_0 \rightarrow 0$ мы приближаемся к физической постановке задачи: вся область заполнена вытесняемой жидкостью.

На поверхности, через которую осуществляется приток жидкости ($z = 0$) задается максимальная насыщенность вытесняющей жидкости, а также постоянный объёмный расход жидкости (или заданное давление). Под термином «давление» здесь и далее понимается перепад между реальным давлением в порах и давлением на выходе.

На поверхности стока задается нулевая нормальная производная насыщенности.

На непроницаемых стенках нормальные компоненты фазовых скоростей обнуляются, $u_{kn} = 0$, что соответствует нулевым нормальным производным давления и насыщенности.

$x = 0$: $s = 1 - s_2^{res}$; $p = 1$ или $p = p_0(t)$ (режим контроля давления);

$$\text{или } \frac{1}{Hh} \int_{-H/2}^{H/2} \int_{-h/2}^{h/2} u|_{x=0} dydz = 1 \text{ (режим контроля расхода).}$$

$x = 1$: $\frac{\partial s}{\partial x} = 0$; $p = 0$.

$y = \pm H / 2$: $\frac{\partial s}{\partial y} = 0$, $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$.

$z = \pm h / 2$: $\frac{\partial s}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$.

Описание численного алгоритма.

Для решения задачи, то есть для вычисления набора переменных на новом временном слое, используется следующая последовательность процедур:

0. До временного шага поле давления p и поле насыщенности s известны. Оба поля определяются на однородной кубической сетке в центрах ячеек. Поля u_{kj} известны для обеих фаз, и они определяются на гранях ячеек. Каждая компонента вектора скорости определяется в центре грани с нормалью, соответствующей компоненте.

1. Рассчитываются массивы мобильности фаз $M_k(s)$ и коэффициента диффузии $D(s)$, доли мобильности и ее производная по s . Все эти массивы вычисляются с использованием алгебраических выражений в центрах ячеек; производная рассчитывается с использованием конечных разностей.

2. С использованием давления и мобильности в центрах ячеек, вычисляется поле скоростей u_j на соответствующих гранях ячеек с применением подхода конечных разностей и арифметического осреднения; затем это поле проецируется на центры ячеек с использованием арифметического осреднения. На гранях, соответствующих стенкам, используется граничное условие непроницаемости.

3. Уравнение (1.5) представляется в следующей конечно-разностной форме, если аппроксимировать пространственные производные насыщенности схемой типа «крест»:

$$\frac{\partial s_i}{\partial t} = \sum_k \lambda_{ik}(s_k - s_i) + \lambda_{i0}s_i$$

После этого схема стабилизируется добавлением искусственной диффузии к ее коэффициентам, а 2ой порядок точности достигается вычитанием искусственной антидиффузии.

4. С использованием обновленных коэффициентов λ_{ik} , оценивается значение шага по времени Δt :

$$\Delta t = \frac{C}{\max \sum_k |\lambda_{ik}|}$$

Это выражение обобщает критерий Куранта, который выполняется при $C = 1$. Значение множителя C вводится в качестве параметра расчета.

5. Вычисляется поле насыщенности на следующем шаге. Используется неявная численная схема и метод Bi-CGStab для решения системы линейных уравнений, относящихся к этой схеме.

6. Повторяется пункт 1 для следующего временного шага, то есть рассчитывается обновленная мобильность, доли мобильности и ее производная.

7. Рассчитывается давление на новом временном шаге с использованием схемы «крест» для дискретизации; коэффициенты схемы взяты на новом

временном шаге, а правая часть была вычислена ранее. На внешних стенках ставятся граничные условия непроницаемости, что приводит к условию нулевой нормальной производной. В случае использования размещения давления в центрах ячеек это условие очень простое: в схему не включаются члены с несуществующими ячейками. Для решения системы используется метод Bi-CGStab.

Этот алгоритм обрабатывается за один шаг времени; значение величины шага по времени вычисляется внутри тела метода. После выполнения шага значение времени обновляется.

В результате численного моделирования вытеснения жидкостей из пористой среды получаем распределение всех величин в расчётной области в любой момент времени. Таким образом, по распределению насыщенности можно получить форму поверхности раздела вытесняющей и вытесняемой жидкостей (Рис.1.5) в различные моменты времени, а также график зависимости насыщенности вытесняющей жидкости в образце от времени (Рис 1.6).

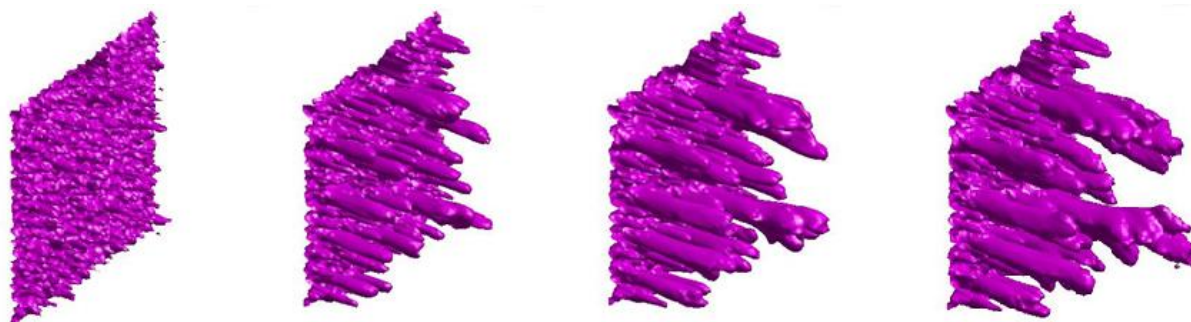


Рис.1.5. Поверхность раздела жидкостей в последовательные моменты времени.

Численное решение производится для безразмерной задачи, таким образом, один расчёт может быть использован для моделирования целого ряда физически подобных процессов вытеснения.

Для обезразмеривания системы были взяты следующие характерные параметры:

$$u_s = v_s = w_s = U; P_s = \frac{\mu_1 L U}{K}; t_s = \frac{L \varphi}{U}; x_s = y_s = z_s = L; \mu_s = \mu_1$$

Где U – средняя скорость фильтрации через поперечное сечение притока; L – длина области; μ_1 – вязкость вытесняющей жидкости; K – проницаемость; ϕ – пористость; u, v, w – компоненты вектора скорости.

Чтобы получить из безразмерной величины времени размерную, необходимо умножить время на размерный коэффициент α . Для режима, при котором в качестве граничного условия выбрано постоянство давления $\alpha = \frac{L^2 \phi \mu_1}{K p}$. Для режима, при котором в качестве граничного условия выбран постоянный расход $\alpha = \frac{L \phi S}{Q}$, где S – площадь поперечного сечения области

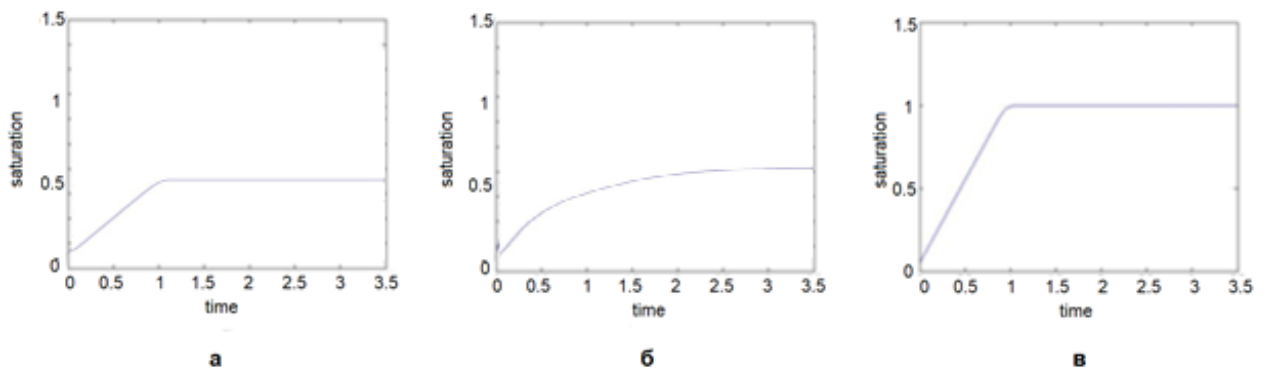


Рис.1.6. Зависимость насыщенности вытесняющей жидкости от времени: а – $M=1$; б – $M=700$; в – $M=1$, нет капиллярных эффектов.

На рис.1.6(а) изображен график с безразмерным временем для расчёта с отношением вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей $M=1$.

На рис.1.6(б) представлен график для расчёта с параметрами, совпадающими с параметрами расчёта 1.6(а) за исключением отношения вязкостей $M=700$.

Отличие в динамике вытеснения в случае 1.6(а) и 1.6(б) объясняется тем, что в случае, когда M близко к единице неустойчивость вытеснения не развивается и форма поверхности раздела в любой момент времени остаётся плоской (рис.1.10(а)). До момента, когда фронт вытеснения доходит до границы расчётной области насыщенность вытесняющей жидкости изменяется линейно, а затем выходит на константу и вытеснение больше не происходит.

В случае же, когда M велико, на границе раздела развивается неустойчивость. Таким образом, фронт вытеснения «размыт» график 1.6(б) оказывается более «пологим» и выход на константу происходит более плавно, чем в случае 1.6(а).

На рис 1.6(в) представлен график для расчёта без учёта капиллярных эффектов. В этом случае вытеснение происходит полностью и в области не остаётся вытесняемой жидкости.

1.2. Эксперименты по вытеснению модели нефти из некоомских песчаников.

Эксперименты были проведены в центре рационального недропользования им. В.И.Шпильмана на установке ПЛАСТ.АТМ-10(рис.1.7) с помощью Козлова И.В. Было проведено 4 эксперимента. Для проведения серии экспериментов был использован составной образец длиной 0,1 м из керна скважины 72 Туканской площади пласта БС-8. В качестве модели нефти поочередно выбирались 2 жидкости: керосин осветительный ТУ 38-401-58-10-01 и гидравлическое масло ВМГ 3 ТУ 0253-085-04001396-04. Вытесняющей жидкостью была выбрана дистиллированная вода.

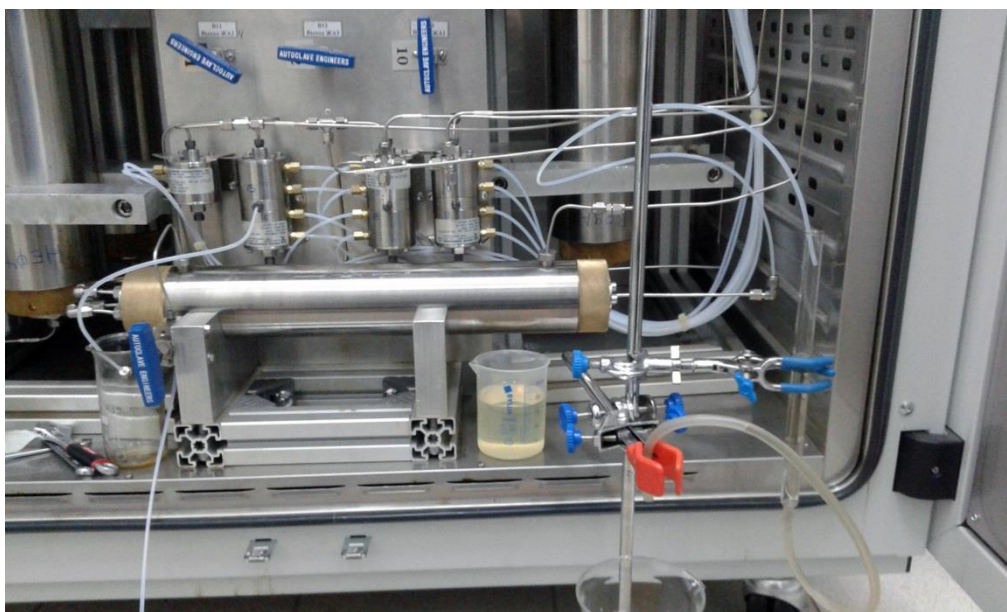


Рис 1.7. Установка ПЛАСТ.АТМ-10 для проведения экспериментов по вытеснению вязкой жидкости из образца пористой среды.

В процессе подготовки жидкостей керосин был профильтрован через силикагель, дегазирован при комнатной температуре в вакуумизаторе при абсолютном давлении 60 мБар; масло дегазировано при комнатной температуре в вакуумизаторе при абсолютном давлении 15 мБар. Для всех жидкостей была измерена плотность набором ареометров АОН-1 и

кинематическая вязкость вискозиметром ВПЖ-2. Результаты приведены в таблице 1.1:

	Плотность, г/см ³	Кинематическая вязкость (измеренная), сСт	Динамическая вязкость (рассчитанная), мПа*с
Вода	0,998	0,884	0,882
Модель нефти (керосин)	0,783	1,246	0,976
Модель нефти (масло)	0,855	28,181	24,095

Табл.1.1. Результаты исследования жидкостей

Образец керна был составлен из трёх цилиндрических образцов.



Рис.1.8. Образцы кернового материала, используемые при проведении эксперимента.

Образцы были высушены до постоянной массы, измерена абсолютная проницаемость каждого образца по сжатому воздуху. Затем образцы керна были насыщены подготовленным керосином в вакууме. Измерена пористость

и объём пор для каждого образца в отдельности гидростатическим взвешиванием по методу Преображенского (табл. 1.2).

№ образца	Диаметр/Длина, см	Абсолютная газопроницаемость, мД	Открытая пористость, %	Объём открытых пор, см ³
1	3,00 / 3,61	652	23,0	5,82
2	3,00 / 3,61	510	22,1	5,62
3	3,00 / 3,61	463	21,3	5,39

Табл.1.2. Результаты исследования образцов керна

Образцы керна находились в сосуде с жидкостью моделирующей нефть до помещения в кернодержатель.

Составной образец помещён в кернодержатель установки моделирования вытеснения жидкостей из керна ПЛАСТ.АТМ-10. Образцы керна устанавливались в порядке уменьшения их абсолютной проницаемости. Создано давление обжима в 4 МПа. Через керн прокачана модель нефти для удаления пузырьков воздуха до установления стабильных показаний перепада давления на входе и выходе кернодержателя.

Затем было произведено вытеснение модели нефти из керна подачей воды во вход кернодержателя. В экспериментах №1 и №2 вода подавалась с поддержанием постоянного расхода, в экспериментах №3 и №4 с поддержанием постоянного перепада давления порядка 0,5 атм.

Жидкость на выходе из кернодержателя собиралась в бюретку для сбора лёгкой фракции с отводом воды. Объем порового пространства, который изначально был заполнен моделью нефти, после вытеснения этой нефти оказался заполнен водой. Таким образом считалось, что объём пор занятых водой равен объёму вытесненной на данный момент нефти (V_{oil}), собранной в бюретке. Насыщенность вытесняющей жидкости в образце рассчитывали как $= V_{oil}/V_{pore}$, где V_{pore} - объём доступных пор. Погрешность определения объёма по бюретке составляет 0,2 мл для керосина и 0,5 мл для масла (в связи с образованием водно-масляной эмульсии на месте мениска).. Динамика

вытеснения на основе расчета водонасыщенности в образце приведена на рис.1.6 а-г.

После окончания процесса вытеснения для каждой из частей (ч1,ч2,ч3) составного образца была измерена остаточная водонасыщенность по СТО 73.10-44-02-10 «Методика выполнения измерений остаточного содержания пластовых флюидов в образцах горных пород» в аппаратах Закса отдельно для каждого образца.

Параметры всех экспериментов представлены в таблице 1.3:

Экс п№	Модел ь нефти	Условие на входе	Объём воды измерен ный (ч1/ч2/ч 3), мл	Объём нефти рассчитанн ый (ч1/ч2/ч3), мл	Водонасы щенность (ч1/ч2/ч3), %	Нефтенасы щенность (ч1/ч2/ч3), %
1	Кероси н	Постоянн ый расход	3,65/ 3,14/ 3,2	1,16/ 1,61/ 1,30	62,7/ 55,9/ 59,4	19,9/ 28,6/ 24,2
2	Масло	Постоянн ый расход	2,9/ 2,62/ 2,5	2,13/ 2,28/ 2,20	49,8/ 46,6/ 46,4	36,5/ 40,5/ 40,8
3	Кероси н	Постоянн ый перепад давления	3,14/ 2,5/ 3,1	1,70/ 2,34/ 1,43	55,0/ 45,2/ 57,5	29,7/ 42,3/ 26,5
4	Масло	Постоянн ый перепад давления	2,5/ 1,8/ 1,94	2,88/ 3,50/ 3,30	43,1/ 32,1/ 34,8	49,6/ 62,4/ 59,3

*Табл. 1.3. Параметры экспериментов по вытеснению нефти из образца
керны*

1.3. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных.

На рис.1.9 представлено сравнение динамики вытеснения в эксперименте и в численном расчёте. Видно, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными для экспериментов №1 и №2 (постоянный расход) и удовлетворительно согласуются с

экспериментальными данными в случае экспериментов № 3 и №4(постоянный перепад давления). Разницу между расчётом и экспериментом можно объяснить тем, что образец керна является неоднородным: во-первых, в нем присутствует естественная неоднородность проницаемости, во-вторых искусственная неоднородность – наличие стыков между составными частями. В расчёте наличие таких неоднородностей не учитывалось. Эти эффекты проявляются только в случае постоянного перепада давления, так как неоднородности керна существенно влияют на расход жидкости. Когда задан постоянный расход эти эффекты себя так сильно не проявляют.

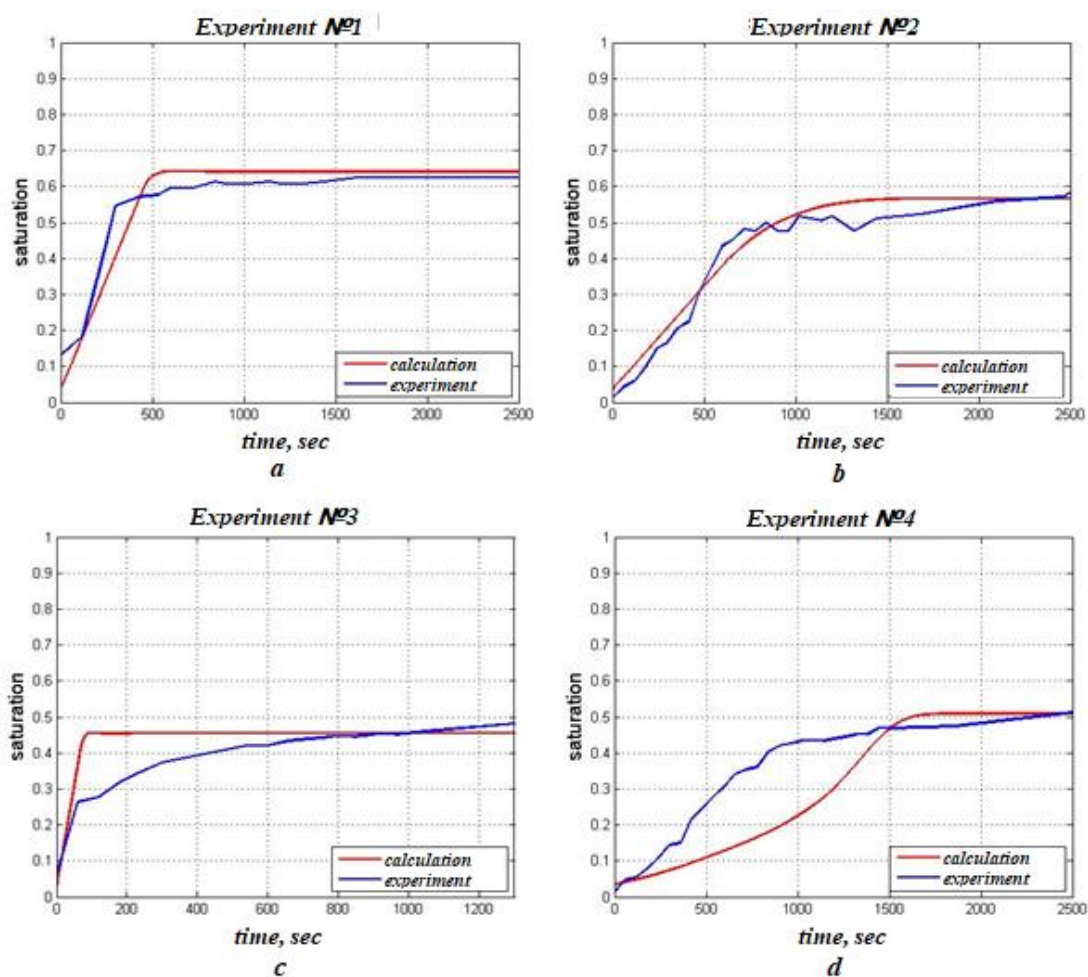


Рис.1.9. Сравнение данных экспериментов по вытеснению жидкости из образца керна с результатами численного моделирования.

Здесь эмпирические константы в модели Леверетта были выбраны так, чтобы остаточная насыщенность и скорость вытеснения в расчете были как

можно ближе к экспериментальному результату. Такой подбор коэффициентов подробно описан в работе [16]. Таким образом, показано, что определение некоторых реологических соотношений для учета влияния капиллярных сил в пористой среде возможно путем обработки результатов таких экспериментов.

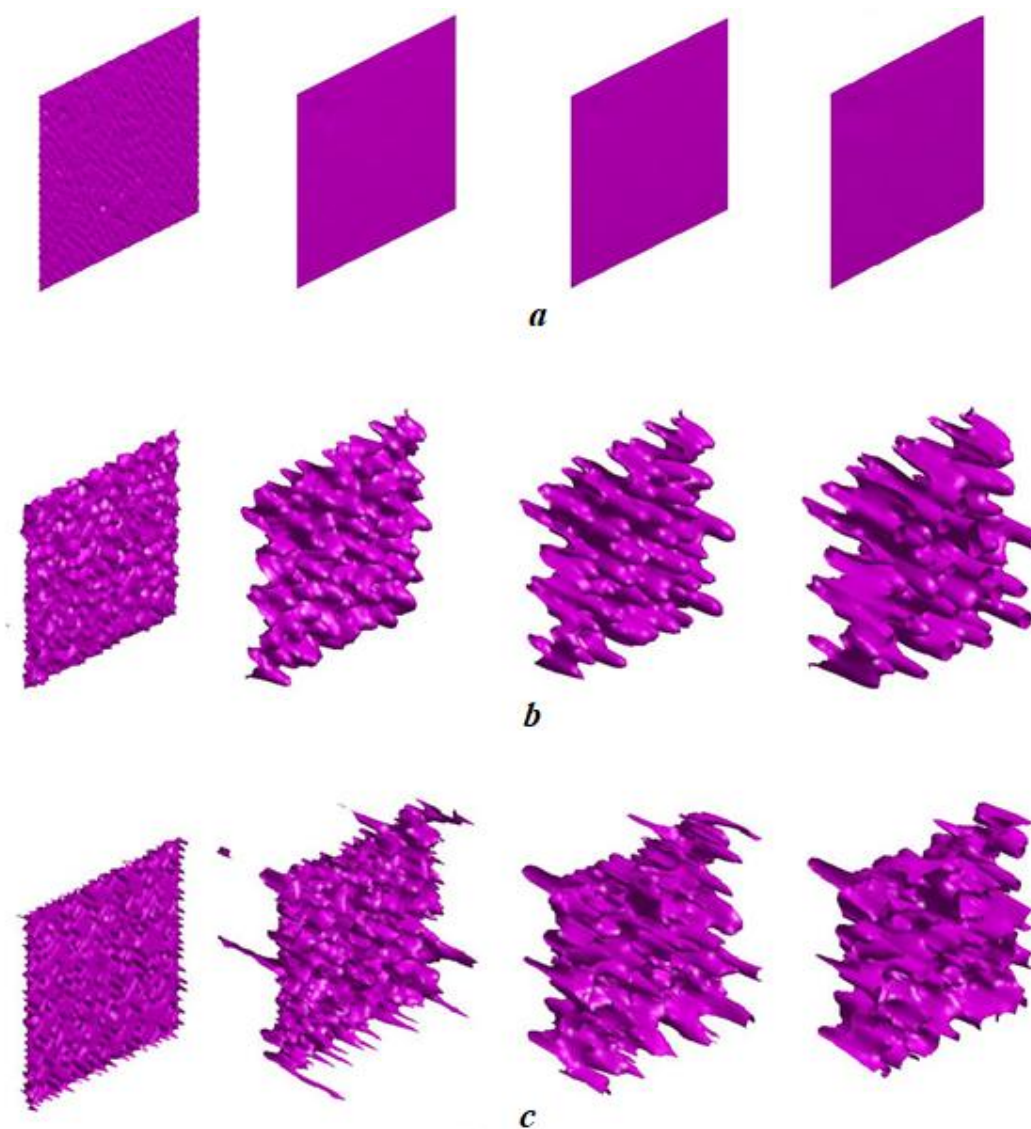


Рис. 1.10. Форма поверхности раздела жидкостей при численном моделировании

На рис.1.10(а) представлено изменение формы поверхности раздела жидкостей в численном расчете для случая вытеснения керосина из воды при постоянном расходе (эксперимент № 1). Для эксперимента № 3 картина

аналогична: отношение вязкости жидкостей близко к 1, поэтому граница раздела в любой момент времени остается плоской (идеальный случай вытеснения возможный в теории, но никогда не реализующийся на практике). Рис.1.10(b) и 1.10(c) соответствуют экспериментам № 2 и № 4 соответственно. В этих случаях наблюдается неустойчивость, развивающаяся на фронте вытеснения.

1.4. Метод подсчёта площади границы раздела фаз.

Граница раздела между двумя фазами не выделяется явно в процессе расчёта. Значение насыщенности вытесняемой жидкости оценивается в каждом вычислительном узле (центре ячейки); поэтому за границу раздела принимается такая поверхность, с одной стороны от которой значение насыщенности больше некоторого заданного s^* , а на другой стороне меньше. Ниже приведен способ расчета площади такой поверхности.

Требуется найти площадь поверхности, разделяющей область данных $s(\vec{x})$ при помощи уравнения

$$\Sigma = \{\vec{x}: s(\vec{x}) = s^*\}, \Sigma^+ = \{\vec{x}: s(\vec{x}) \geq s^*\}$$



Рис 1.11. Тип поверхности, площадь которой вычисляется.

Здесь Σ — поверхность, площадь которой требуется определить, Σ^+ — одна из областей, отделяемая этой поверхностью.

Исходим из того, что данные $s(\vec{x})$ определены в центрах кубических ячеек так, что известны их целочисленные координаты

$$s_m = s(\vec{x}), \quad m = M(\vec{n}),$$

где m — номер ячейки, $M(\vec{n})$ — взаимно-однозначный перевод целочисленных координат в целое число.

Каждая кубическая ячейка m имеет 8 вершин; в каждой из которых данные можно определить интерполяцией. В ином варианте распределения данных они изначально заданы в вершинах ячеек, ячейки же определенным образом группируют данные. Поскольку сетка кубическая, связь между координатами центров ячеек и целочисленными координатами данных в этих центрах такова

$$\vec{x}_m = \left(\vec{n}_m + \frac{1}{2} \right) h - \vec{x}_c.$$

Здесь h – размер ячейки, а \vec{x}_c – смещение системы координат.

Предлагаемое решение

Инициализируем площадь поверхности $|\Sigma|$ нулем. Обходим все ячейки домена, и для каждой ячейки m определяем число t_m выполнений условия

$$\vec{x}_{mj} \in \Sigma^+, j = 0, \dots, 7$$

где j – индекс вершины ячейки. Для расчета этого условия либо требуется интерполировать данные в вершину, либо напрямую использовать сами данные, если они заданы в вершинах. При расчете интерполяции удобно воспользоваться соотношением

$$x_{mji} = \begin{cases} x_{mi} + \frac{h}{2}, & j_i = 1, \\ x_{mi} - \frac{h}{2}, & j_i = 0. \end{cases}$$

Здесь j_i – i -ая двоичная цифра индекса j , $i = 0, 1, 2$.

Сама площадь определяется формулой

$$|\Sigma| = \sum_m W(\delta_m) h^2,$$

Где $W(\delta)$ – весовая функция, зависящая от целого числа $\delta = 0, 1, \dots, 7, 8$. Физический смысл весовой функции – среднее значение площади

поверхности, отсекающей δ вершин кубической ячейки, деленная на площадь грани ячейки. Функция безразмерна.

Функцию $W(\delta)$ можно определить калибровкой на известных фигурах. Одно из ее свойств – симметрия, а также нулевые значения при $\delta = 0$ и $\delta = 8$. Симметрия проявляется в том, что

$$W(8 - \delta) = W(\delta)$$

Кроме того, логично, чтобы от $\delta = 1$ до $\delta = 4$ функция была положительной и возрастающей. Вследствие симметрии и нулевых значений $W(\delta)$ на краях диапазона, можно ограничиться набором независимых величин $w_k, k = 0, 1, 2, 3$ таких что

$$W(\delta) = \begin{cases} w_{\delta-1}, & 1 \leq \delta \leq 4, \\ w_{8-\delta-1}, & 4 \leq \delta \leq 7, \\ 0, & \delta = 0, \delta = 8. \end{cases}$$

Определение весовых коэффициентов

На основе случайных параметров строится N_t калибровочных тел, поверхность которых вложена в заданный домен, разбитый на кубы. По параметрам тел определяются истинные площади их поверхности $A_n, n = 0, \dots, N_t - 1$. Далее для каждого теста n рассчитываются параметры

$$a_{nj} = \sum_{m: \delta_m=j} \delta_m h^2.$$

Пользуясь симметрией $W(t)$ и игнорируя ее крайние значения, переходим к 4 независимым параметрам b_{nj}

$$b_{n,j-1} = a_{n,j} + a_{n,8-j}, j = 1, \dots, 3; b_{n,3} = a_{n,4}$$

Требуется решить систему линейных уравнений

$$\sum_{j=0}^3 b_{nj} w_j = A_n$$

но при достаточно большом числе тестов это будет переопределенная система, решений не имеющая. Ее можно решить в смысле минимально возможного приближения по норме L_2 (методом минимальных квадратов), для чего левую и правую части системы умножают на транспозицию матрицы b_{nj}

$$\sum_{j=0}^3 B_{ij} w_j = C_i, i = 0, \dots, 3; B_{ij} = \sum_{n=0}^{N_t-1} b_{ni} b_{nj}, C_i = \sum_{n=0}^{N_t-1} b_{ni} A_n$$

Линейная система имеет положительно определенную симметричную матрицу, если только число тестов не меньше 4, и не было набора одинаковых матричных коэффициентов b_{nj} в двух или более различных тестах. Ее решение (например, методом Холецкого) дает систему весовых коэффициентов, минимизирующую отклонение расчетной площади поверхности от истинной для указанных тестов в смысле нормы L2.

4.3. Результаты для весовых коэффициентов

В качестве тестовых фигур брались модифицированные цилиндры высотой H и радиусом R , у которых плоские торцы заменены полушариями радиуса R (рис.1.12)

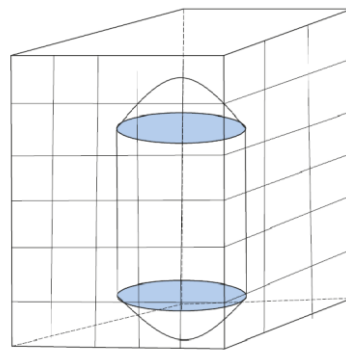


Рис.1.12. Модифицированный цилиндр, помещенный в расчетную область

Площадь поверхности такого модифицированного цилиндра равна

$$A = 4\pi R^2 + 2\pi RH.$$

При $H = 0$ такой модифицированный цилиндр переходит в сферу.

Параметры R , H брались случайно с равномерным распределением

$$R_{min} \leq R \leq R_{max}, \quad H_{min} \leq H \leq H_{max}$$

и смещением центра относительно начала координат в пределах куба:

$$0 \leq |x_{ci}| \leq x_{max}$$

Также цилиндрическое тело случайным образом располагалось в пространстве. Чтобы обеспечить равномерность распределения ориентации, использован подход случайного нормализованного кватерниона ориентации [168].

После расчетов весовых коэффициентов на основе площадей модифицированных цилиндров получены следующие результаты, с точностью до 10 десятичных знаков (табл. 1.4). Во второй колонке приведены данные без учета произвольной ориентации, в третьей – с учетом.

t	W(δ)	W(δ) (поворот)
0	0	0
1	0.3260309507	0.4229994152
2	0.6234070489	0.6475331995
3	0.8802570752	0.7276973698
4	1.0140847622	0.9798320716
5	0.8802570752	0.7276973698
6	0.6234070489	0.6475331995
7	0.3260309507	0.4229994152
8	0	0

Табл. 1.4. Результаты для весовых коэффициентов

Результаты получены на сетке 200x200x200 с размером ячейки $h = 0.01$; число тестов $N_t = 50$. Точность расчета площади поверхности по норме L2, проверенная на таких же фигурах (при ином их случайном расположении) оценена в $8.25 \cdot 10^{-6}$ без поворота, $1.96 \cdot 10^{-5}$ с поворотом.

Исследование эволюции площади поверхности раздела фаз

Описанный выше метод расчета площади поверхности позволяет количественно охарактеризовать развитие неустойчивости и изучить влияние

на развитие неустойчивости различных параметров. Следует отметить, что точность такого алгоритма зависит от разрешения сетки: любая поверхность на уровне одной ячейки всегда может быть аппроксимирована цилиндром или полушарием. Чем мельче сетка, тем выше точность такого приближения.

Все графики ниже показывают отношение площади поверхности раздела фаз к площади поперечного сечения керна, из которого происходит вытеснение. Далее эта величина называется безразмерной площадью поверхности раздела.

Граница раздела фаз была рассчитана для численного моделирования с параметрами, соответствующими экспериментам № 1-№. 4. Результаты представлены на рисунках 1.13-1.16.

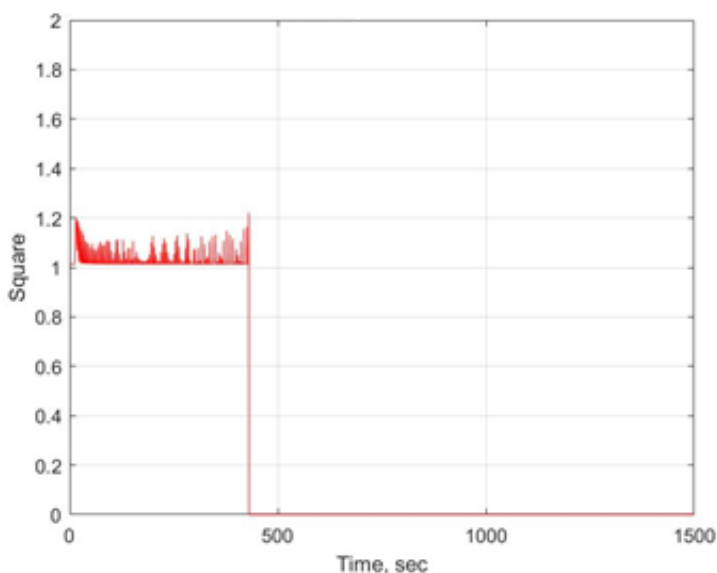


Рис.1.13. Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для численного расчета, соответствующего эксперименту № 1.

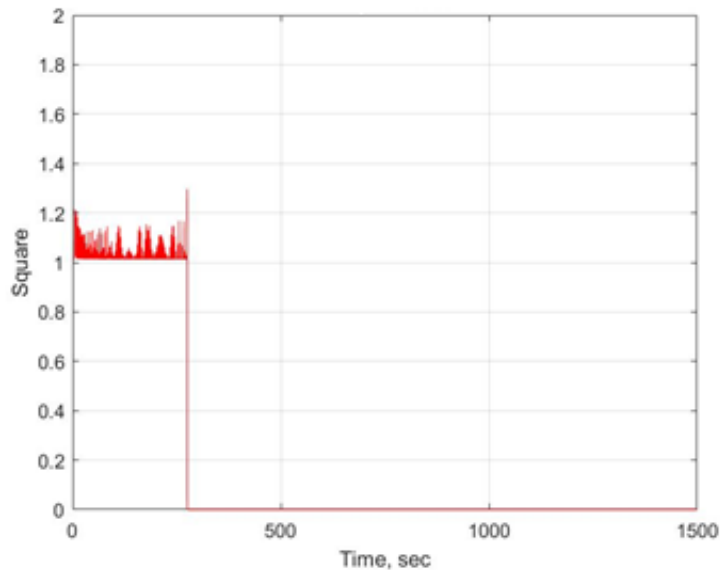


Рис.1.14. Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для численного расчета, соответствующего эксперименту № 3.

Теоретически, когда отношение вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкости меньше или равно 1, вытеснение имеет поршневой характер (фазовая граница раздела все время остается плоской и неустойчивость не развивается, несмотря на возникающие флуктуации). На практике такой случай никогда не реализуется (поскольку условия эксперимента не идеальны, среды не однородны и т. д.) Эволюция изменения площади раздела фаз для экспериментов № 1 и № 3 показана на рис.1.13 и рис.1.14 соответственно. В случае, когда отношение вязкости около 1 (керосин-вода), вытеснение близко к поршневому (рис.1.10а). Площадь поверхности колеблется вблизи значения 1. Неустойчивость не развивается, и случайные отклонения поверхности от плоской формы подавляются стабилизирующими факторами, такими как капиллярные эффекты. Когда поверхность достигает границы вычислительной области, значение площади резко падает до нуля.

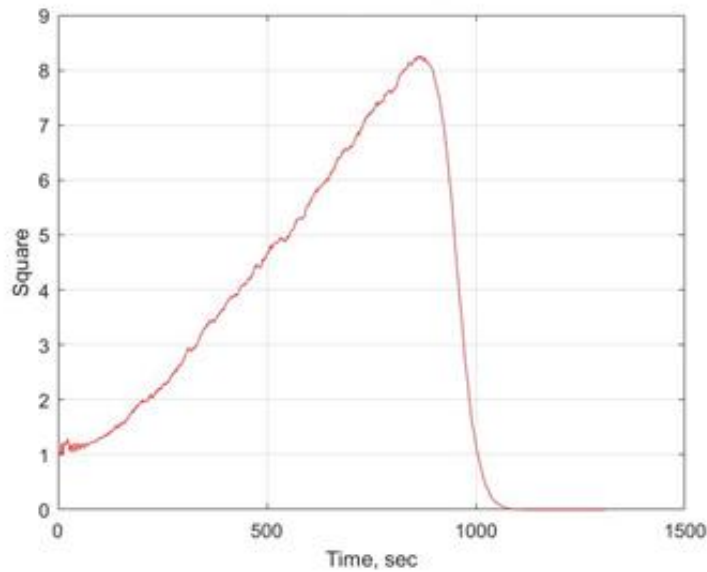


Рис.1.15. Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для численного расчета, соответствующего эксперименту № 2.

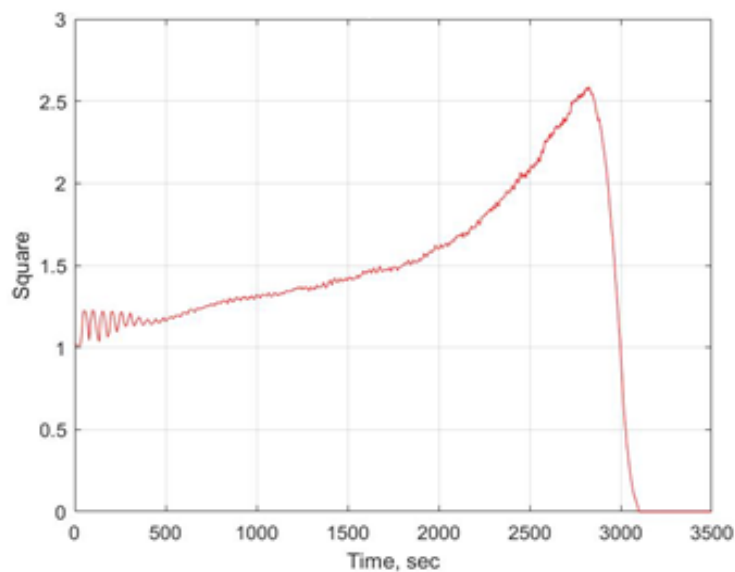


Рис.1.16. Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для численного расчета, соответствующего эксперименту № 4.

Эволюция площади раздела фаз для экспериментов № 2 и № 4 показана на рис.1.15 и рис.1.16 соответственно. В случае, когда коэффициент вязкости большой (масло-вода), имеет место развитие неустойчивости. Площадь поверхности в начале резко увеличивается, пока первый «вязкий палец» воды не пробьет поверхность выхода. Кроме того, жидкость движется в основном в

образованном канале, и значение площади постепенно уменьшается и достигает постоянного значения после полного вытеснения.

Также исследуется влияние следующих параметров на эволюцию границы раздела фаз: отношение вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей; число Пекле; перепад давления на входе и выходе образца пористой среды (рис.1.17 - рис.1.19 соответственно).

Для вычисления числа Пекле использовалось выражение: $Pe = \frac{Lv}{D_0}$, где L - характерный размер, $v = \frac{K \Delta P}{\mu_1 L}$ скорость, $D_0 = \frac{a_j c_j \sigma |\cos \theta| \sqrt{K \phi}}{s_{max} - s_{min}} \cdot \frac{1}{\mu_1}$ коэффициент диффузии пропорциональный D .

$$\text{Таким образом, } Pe = \frac{(s_{max} - s_{min})}{a_j c_j \sigma |\cos \theta|} \sqrt{\frac{K}{\phi}} \Delta P$$

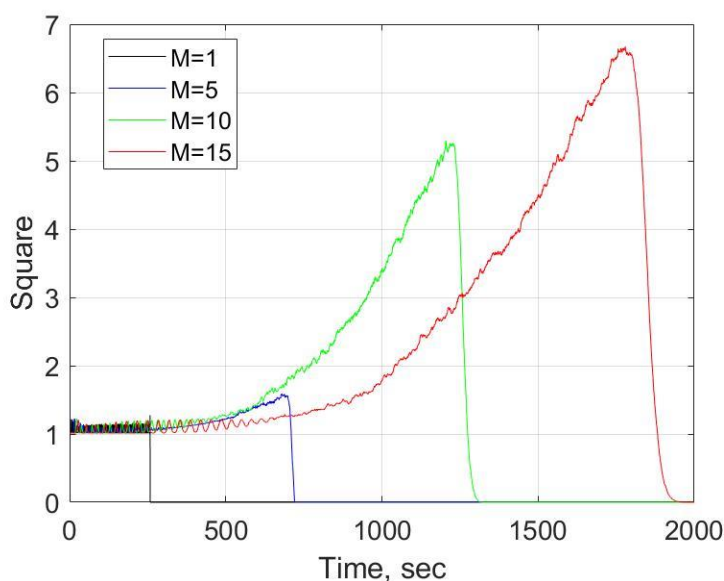


Рис.1.17. Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для расчетов с различными значениями отношения вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей ($M = \mu_2/\mu_1$)

Таким образом, с увеличением отношения вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей неустойчивость фронта вытеснения развивается сильнее, в то время как скорость фронта уменьшается, а время полного

вытеснения увеличивается (рис.1.17).

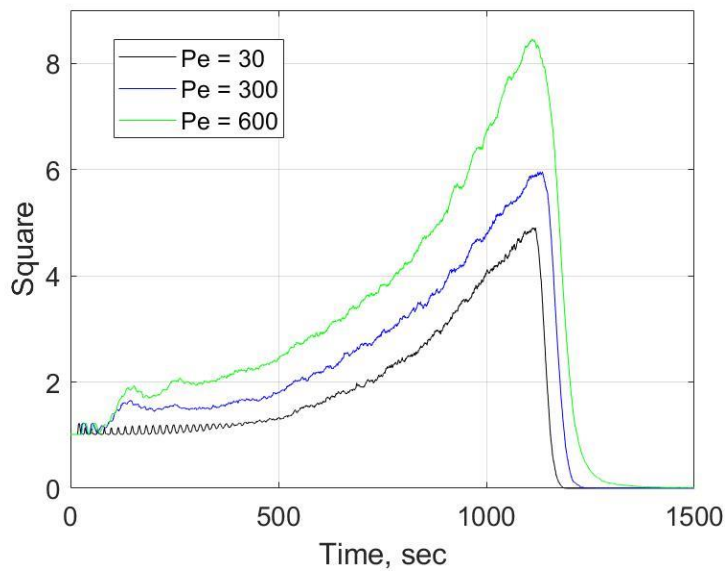


Рис.1.18. Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для расчетов с различными значениями числа Пекле (Pe)

Число Пекле характеризует связь между конвективными и молекулярными процессами. Как и ожидалось, результаты расчетов показали, что с увеличением числа Пекле неустойчивость фронта увеличивается, а время полного вытеснения существенно не изменяется (рис.1.18).

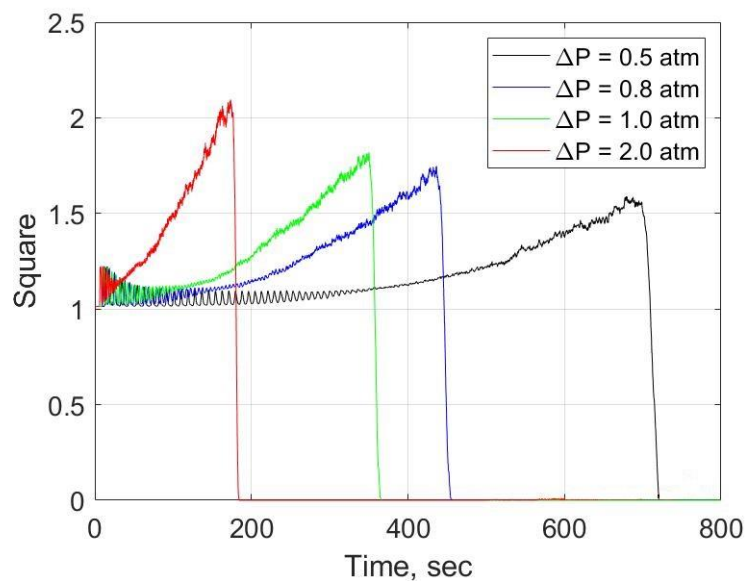


Рис.1.19. Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для расчетов с различными значениями перепада давления (ΔP) на входе и выходе образца пористой среды.

С увеличением перепада давления на входе и выходе образца пористой среды развитие неустойчивости усиливается, а время полного вытеснения нефти из образца уменьшается (рис.1.19).

На рис.1.20 представлена зависимость результатов подсчёта площади поверхности раздела фаз от количества расчётных ячеек. Как видно, начиная с некоторого количества ячеек ($\approx 90*90*90$) результат не зависит от разбиения расчётной области.

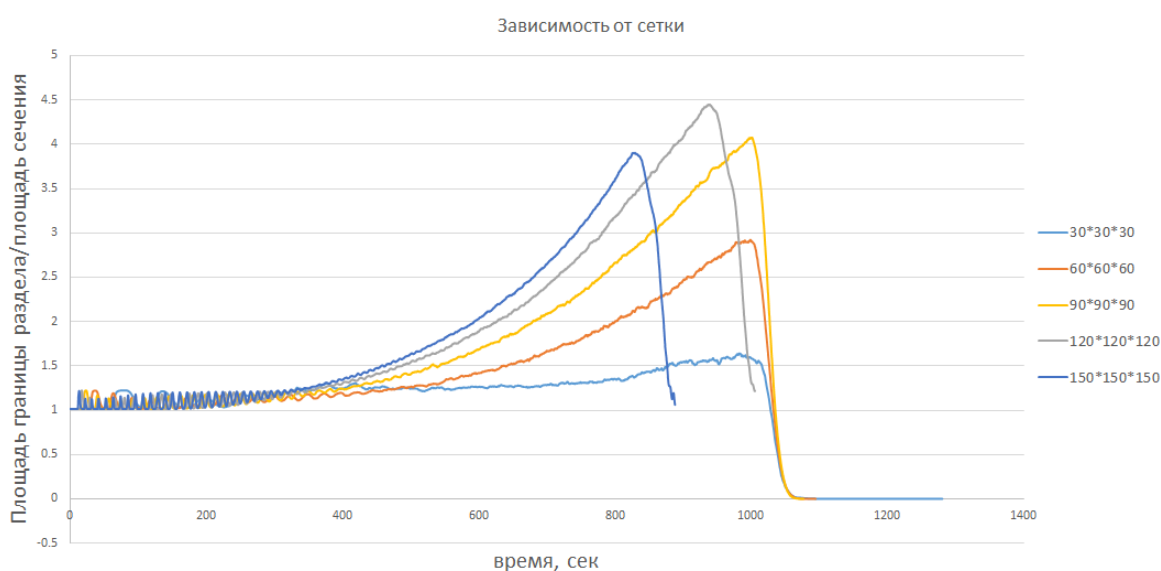


Рис.1.20. Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для расчетов с различным количеством ячеек в расчётной области.

1.5. Метод учёта подсеточной неустойчивости при моделировании процесса вытеснения на макроуровне.

Все существующие методы моделирования процессов подземной гидродинамики объединяет то, что для моделирования на макро- и микроуровнях используются одинаковые системы уравнений. Значительным отличием метода, описанного в этой части диссертации, от известных существующих методов является то, что в данном способе (запатентованном автором диссертации с соавторами) для проведения апскейлинга в дифференциальные уравнения на макроуровне добавляются дополнительные

корректирующие члены, коэффициенты для которых получены из исследований на микроуровне. В зависимости от физических свойств, полученных при исследовании процесса на микроуровне, меняется модель на макроуровне за счёт учета дополнительных потоков в уравнениях. Такой подход даёт возможность учесть неустойчивость, не прибегая к мелкому разбиению, что также сопровождается экономией расчетного времени.

Коэффициент извлечения нефти по большинству отечественных месторождений не превосходит 30%, а в большом числе случаев опускается ниже 20% , при этом, трудно извлекаемые запасы нефти в России составляют 60-70%. Один из методов нефтедобычи предполагает вытеснение углеводорода, при этом, на фронте вытеснения развивается неустойчивость, существенно сказывающаяся на качестве нефтедобычи.

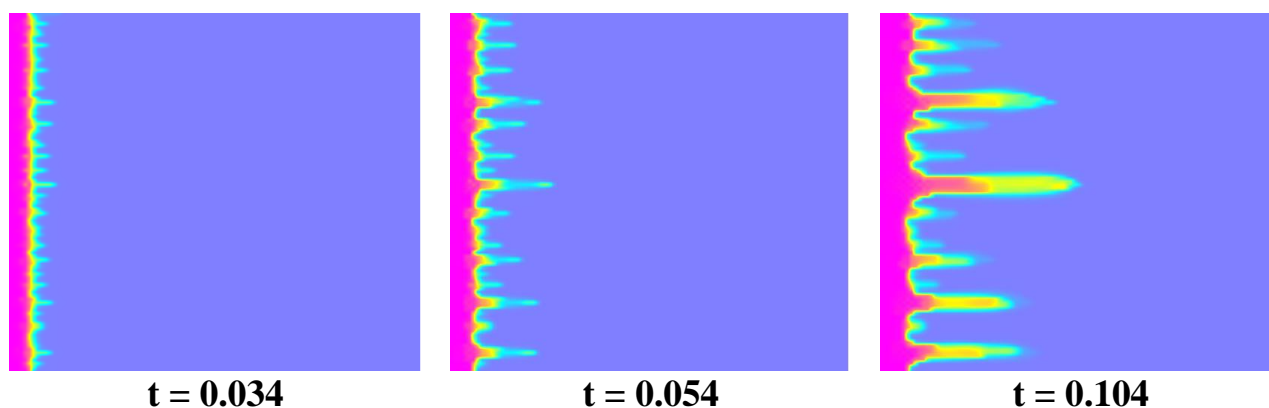
Предлагаемый метод позволяет создать специализированный программный комплекс для предсказательного моделирования неустойчивого вытеснения нефти из природных коллекторов на малом масштабе, работающего как самостоятельно, так и допускающего интегрирование в любой коммерческий симулятор подземной гидродинамики.

Особенностью специализированного программного комплекса является то, что он позволит осуществлять многомасштабное моделирование нелинейных процессов вытеснения углеводородов с учетом возникающей неустойчивости фронта и даст возможность оценки качества вытеснения в условиях неустойчивых режимов с разрешением на уровне 1 см, и в то же время без уменьшения общей области моделирования, а также без увеличения времени вычислений. Полученные результаты могут привести к увеличению нефтеотдачи на 3-10%.

Предлагаемый метод позволит учитывать эффекты с разрешением на несколько порядков выше, но без увеличения времени расчета.

Задача вытеснения углеводородов осложняется тем, что в практических случаях ее приходится решать на значительном пространственном масштабе. В то же время из-за использования менее вязкой воды для вытеснения более

вязкой смеси углеводородов (пластовой нефти) этот процесс является неустойчивым: фронт вытеснения, даже если он был вначале прямым, искажается за счет пальцеобразных выступов, по которым менее вязкая вода прорывается к добывающей скважине, оставляя позади себя невытесненную нефть. После достижения одним из таких выступов добывающей скважины картина вытеснения резко меняется – большая часть подаваемой воды будет направляться в канал, созданный лидирующим пальцем. В скважину начинает закачиваться уже не нефть, а ее смесь с вытесняющей водой, причем процент воды будет быстро увеличиваться. Оставшаяся же в пласте нефть после такого прорыва будет практически неподвижна. Рис.1.21 иллюстрирует двумерную картину развития неустойчивости фронта вытеснения жидкости при перепаде вязкостей 1:100 (вытесняющей к вытесняемой жидкости); маловязкая жидкость вытесняет более вязкую, видно образование каналов, по которым в основном и течет вытесняющая жидкость, оставляя позади вытесняемую. Изображена насыщенность вытесняющей фазы (минимальная – синий, максимальная – пурпурный). Под каждой картинкой подписано безразмерное время; единице в этой шкале соответствует время, за которое бы при устойчивом фронте вытеснения вся жидкость в области была бы замещена. Видно, что при неустойчивом фронте прорыв вытесняющей жидкости осуществляется в 5 раз раньше этого момента, но объем вытеснения значительно уменьшен.



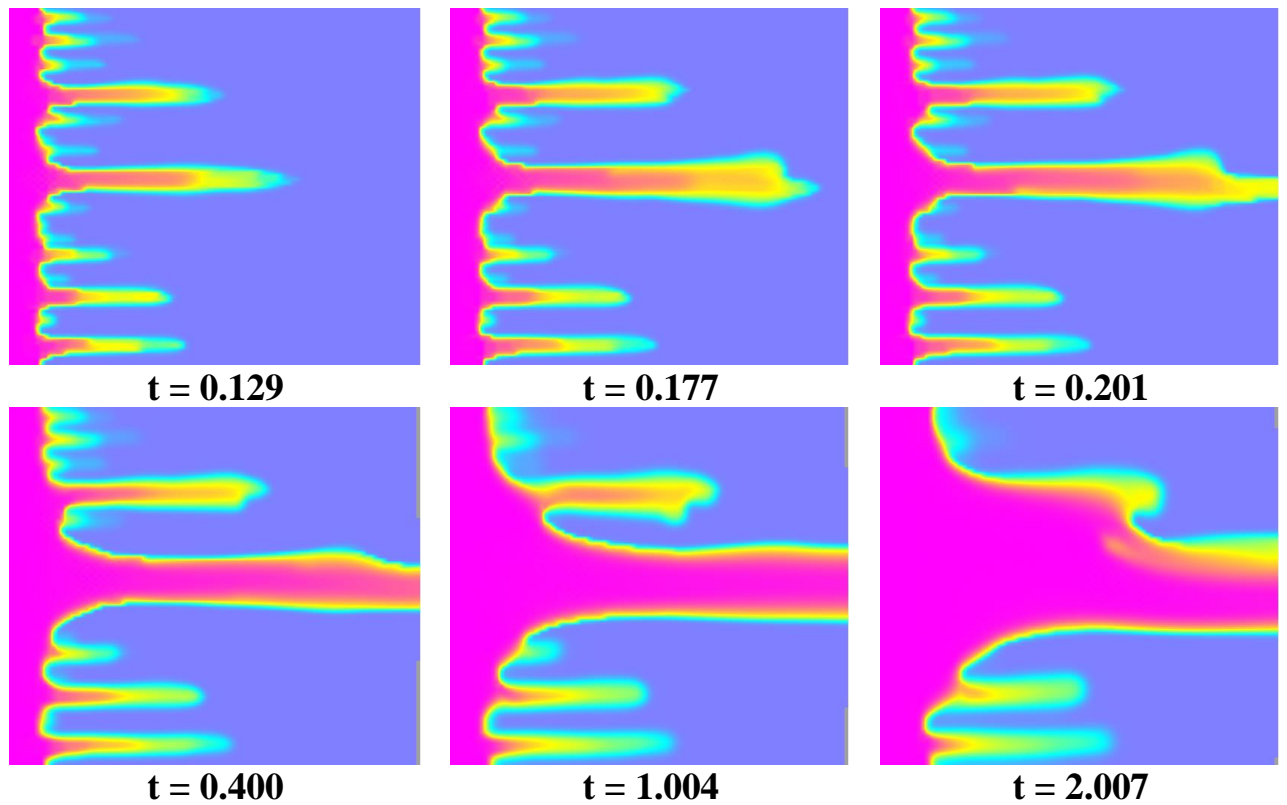


Рис.1.21. Двумерная картина развития неустойчивости фронта вытеснения жидкости при перепаде вязкостей 100:1 (вытесняемой к вытесняющей жидкости).

Рис.1.22 иллюстрирует вид поверхности, разделяющей вытесняемую и вытесняющую жидкости, с двух точек зрения в последовательные моменты времени при трехмерном моделировании. Соотношение вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкости 1:100. Под каждой картинкой подписано безразмерное время; единице в этой шкале соответствует время, за которое бы при устойчивом фронте вытеснения вся жидкость в области была бы замещена. Прорыв происходит раньше, чем при двумерном моделировании, результаты которого показаны на предыдущей фигуре.

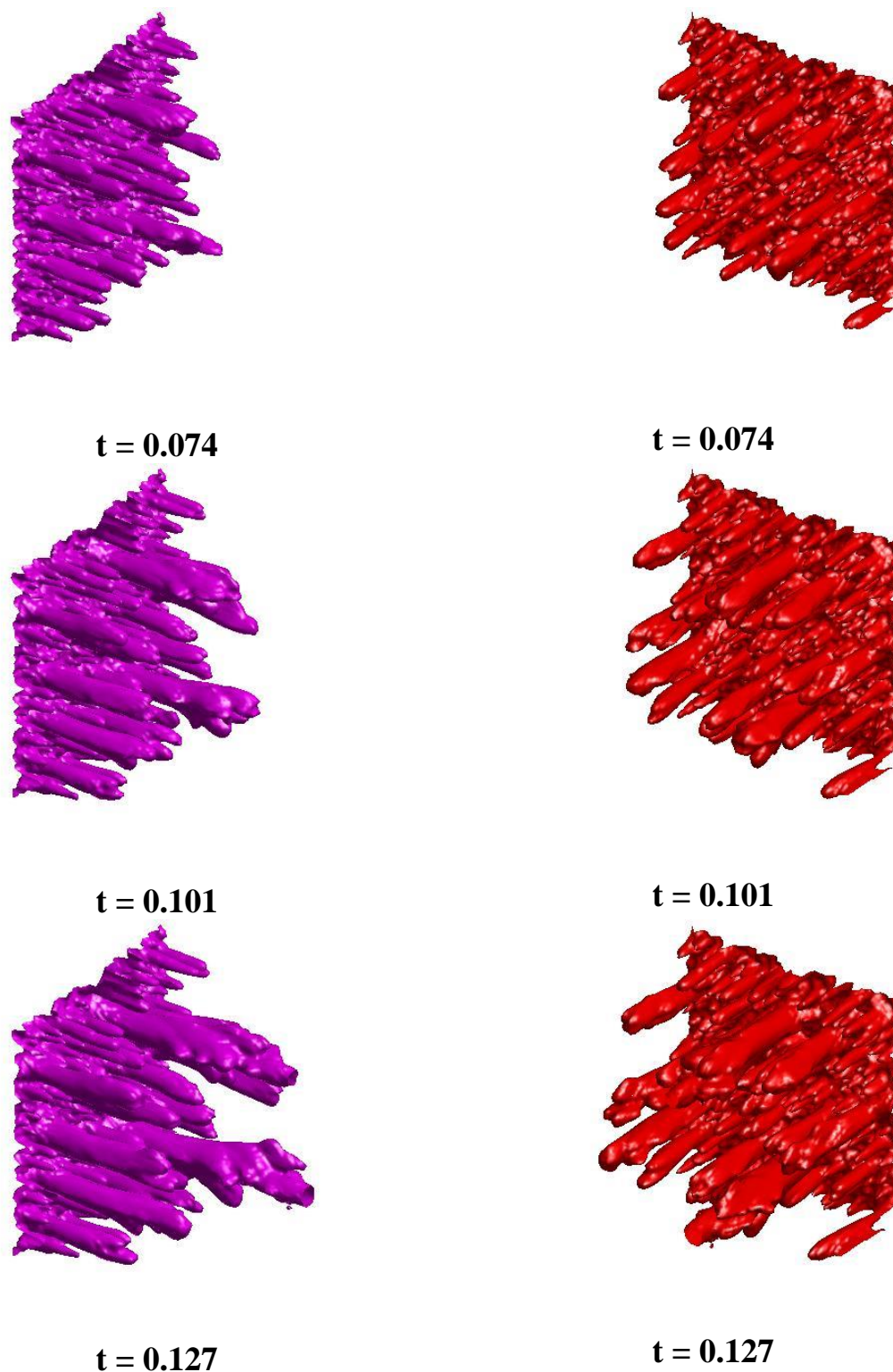


Рис.1.22. Вид поверхности, разделяющей вытесняемую и вытесняющую жидкости, с двух точек зрения в последовательные моменты времени при трехмерном моделировании.

Описываемая здесь неустойчивость многомасштабна, и дело ее моделирования осложняется тем, что наиболее быстро растут мелкомасштабные «пальцы». Основная проблема прямого моделирования

неустойчивости в том, что разрешение мелкомасштабных потоков на практической сетке нереально даже с использованием современной вычислительной техники. Например, при обработке малого участка месторождения размером 10 x 10 x 1 км с ячейками размером 1 x 1 x 1 м потребуется 100 млрд. ячеек. Такая крупная задача находится на пределе возможности современных вычислительных комплексов. Но разрешить неустойчивости размером по ширине менее 3 ячеек численная схема не способна. Тем самым пальцеобразные выступы вытесняющего агента шириной менее 3 м, проникающие в вытесняемую нефть, на такой сетке не только не будут обнаружены, но решение вообще не будет учитывать их влияние, хотя бы и скрытое, на процесс вытеснения. Уменьшение же линейного размера ячейки в 10 раз увеличивает число ячеек двумерной сетки в 100, а трехмерной в 1000 раз. В то же время опыт показывает, что значение имеет пальцеобразная неустойчивость фронта вытеснения для размеров порядка 1 см. Весьма важно и то, что реальный фронт вытеснения имеет существенно трехмерную структуру, что видно из развития трехмерной картины вытеснения, изображенной на рис.1.22, где в двух проекциях изображен вид поверхности, разделяющей вытесняемую и вытесняющую жидкости. Картина эта показывает, что прорыв маловязкой жидкости в случае неустойчивости фронта вытеснения проходит по каналам, имеющим форму, близкую к цилиндрической, и тем самым объем невытесненной жидкости при трехмерном моделировании выше, чем при двумерном. Это говорит о том, что для решения задачи, позволяющей учитывать мелкую структуру вытеснения, требуется именно трехмерное моделирование с мелким разрешением. Измельчение исходной сетки до такого масштаба делает решение задачи вытеснения если и не невозможным, то не применимым на практике.

В то же время учесть влияние мелкомасштабной (подсеточной) неустойчивости при решении глобальной задачи на грубой сетке возможно. Для этого с уравнениями глобальной задачи поступают так же, как поступают с уравнениями Навье – Стокса при моделировании эффектов подсеточной

турбулентности: вводится временной масштаб осреднения параметров (в данном случае насыщенности фаз, их скорости и давления). Затем решение представляется как сумма среднего на этом временном масштабе и осциллирующего, после чего уравнения осредняются.

В случае уравнений Навье – Стокса такое осреднение называется осреднением по Рейнольдсу, оно приводит к тому, что в осредненных уравнениях появляются новые члены, прежде всего в конвективных составляющих уравнений импульса. Эти новые члены, дополнительные потоки импульса, требуют дополнительного эмпирического моделирования, которое в различных моделях турбулентности проводится различным способом, но самым простым и, тем не менее, результативным во многих случаях является способ алгебраический.

В случае подобной обработки уравнений динамики насыщенности новые члены также возникнут, и они будут соответствовать дополнительным потокам массы фаз. Эти потоки учитывают влияние мелкомасштабной неустойчивости, которая в данной модели скрыта на фоне среднего решения, и, тем не менее, выражается в резком усилении фактических фильтрационных потоков фаз. Собственно, именно эти потоки и ответственны за возможный преждевременный прорыв воды к добывающей скважине; преждевременным он будет относительно времени прорыва, полученного на грубой (глобальной) сетке без учета дополнительных членов.

Основной задачей описываемого метода является повышение точности расчетов и сокращение времени их проведения при построении реальной модели прогнозирования протекания процессов в нефтесодержащих пластах. Технический результат заключается в изменении модели на макроуровне за счёт дополнительных потоков в уравнениях в зависимости от физических свойств, полученных при исследовании процесса на микроуровне.

Указанные задача и технический результат достигаются использованием способа многомасштабного моделирования нелинейных процессов подземной гидродинамики, включающим разбиение исследуемой

геологической структуры на крупномасштабные блоки (КМБ), разбиение КМБ на более мелкомасштабные блоки (ММБ), вычисление значения физических свойств для ММБ после чего вычисление значения физических свойств для КМБ, при этом, вычисления значений физических свойств для КМБ осуществляют с учетом дополнительных корректирующих членов уравнений, коэффициенты для которых получены из вычислений для ММБ, а в качестве физического свойства, определяемого на ММБ, определяют неустойчивость на фронте вытеснения углеводорода из пласта.

Для вычисления физических свойств для ММБ формируют диапазон возможных безразмерных параметров и контрольных точек в фазовом пространстве этих параметров внутри этого диапазона, проводят различные варианты расчетов на основе указанных параметров и формируют интерполяционные зависимости результатов от введенных параметров, с помощью которых определяют коэффициенты дополнительных корректирующих членов уравнений для определения значений физических свойств для КМБ. Рис.1.23. иллюстрирует блок-схему работы алгоритма, с включением расчета на двух уровнях, глобальном и локальном.



Рис.1.23. Блок-схема работы алгоритма, с включением расчета на двух уровнях, глобальном и локальном.

Вычисление физических свойств для ММБ осуществляют из уравнений динамики вытеснения:

$$\frac{\partial \rho \varphi s_j}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_j) = 0 \quad (1.6.1)$$

$$\mu_j \mathbf{v}_j = -K k_j^R(s_j) \nabla p_j \quad (1.6.2)$$

$$p_2 - p_1 = p_c(s_1) \quad (1.6.3)$$

ρ – плотность, φ – пористость, s_1, s_2 – насыщенности фаз, k_1^R, k_2^R – относительные проницаемости фаз, μ_1, μ_2 – динамические вязкости фаз, K – абсолютная проницаемость, $-\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ вектора скорости фильтрации фаз, p_1, p_2 – давление в фазах, p_c – капиллярное давление.

Система содержит уравнение динамики массы каждой фазы (1.6.1), закон Дарси для каждой фазы (1.6.2), связь между давлениями в фазах через капиллярное давление (1.6.3) и дополнительные алгебраические соотношения (1.6.4). Уравнения глобальной системы приведены в размерном виде.

Вычисление физических свойств для КМБ осуществляют из соотношений:

$$\frac{\partial \rho \varphi s_j}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_j + \overline{\rho f(\dot{s}_j) \dot{\mathbf{v}}}) = 0 \quad (1.7.1)$$

$$f(s_j) = \frac{m_j(s_j)}{m_1(s_1) + m_2(s_2)} \quad (1.7.2)$$

$$m_j = \frac{k_j^R(s_j)}{\mu_j} \quad (1.7.3)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \dot{\mathbf{v}}_1 + \dot{\mathbf{v}}_2, \quad \overline{\dot{\mathbf{v}}_1} = -\overline{\dot{\mathbf{v}}_2} \quad (1.7.4)$$

m_j – относительная мобильность фазы, \mathbf{v} – суммарная объемная скорость фильтрации, штрихом обозначены пульсационные составляющие переменных, чертой сверху обозначены средние величины.

Возникающий в результате осреднения член содержится в уравнениях динамики массы потоков, и его структура приведена в системе (1.7). Уравнение (1.7.1) – это уравнение динамики массы фаз после осреднения,

содержащее дополнительный член, выражение (1.7.2) определяет структуру зависимости потока от насыщенности, которая подвергается дополнительному осреднению, выражения (1.7.3) и (1.7.4) определяют относительную мобильность фаз и суммарную скорость фильтрации, соответственно.

Дополнительные потоки моделируются алгебраически, будучи частично разделены на конвективную и диффузионную составляющие. Дополнительные потоковые члены должны обнуляться в том случае, когда вытеснение устойчиво на микроуровне, и тогда, когда насыщенность какой-либо фазы уменьшается до остаточной. Они зависят алгебраически от небольшого набора безразмерных параметров, регулирующих неустойчивость вытеснения. В частности, члены, усиливающие неустойчивость, должны в общем случае увеличиваться с ростом отношения вязкости вытесняемой жидкости к вязкости вытесняющей, и уменьшаться с ростом диффузии, возникающей вследствие капиллярных эффектов, и формирующей вместе с характерной скоростью фильтрации жидких фаз безразмерное число Пекле. Ниже приведена форма моделирования дополнительных потоков (1.8.1) и перечислены основные безразмерные параметры (1.8.2), от которых в большей или меньшей степени зависят дополнительные фильтрационные потоки фаз.

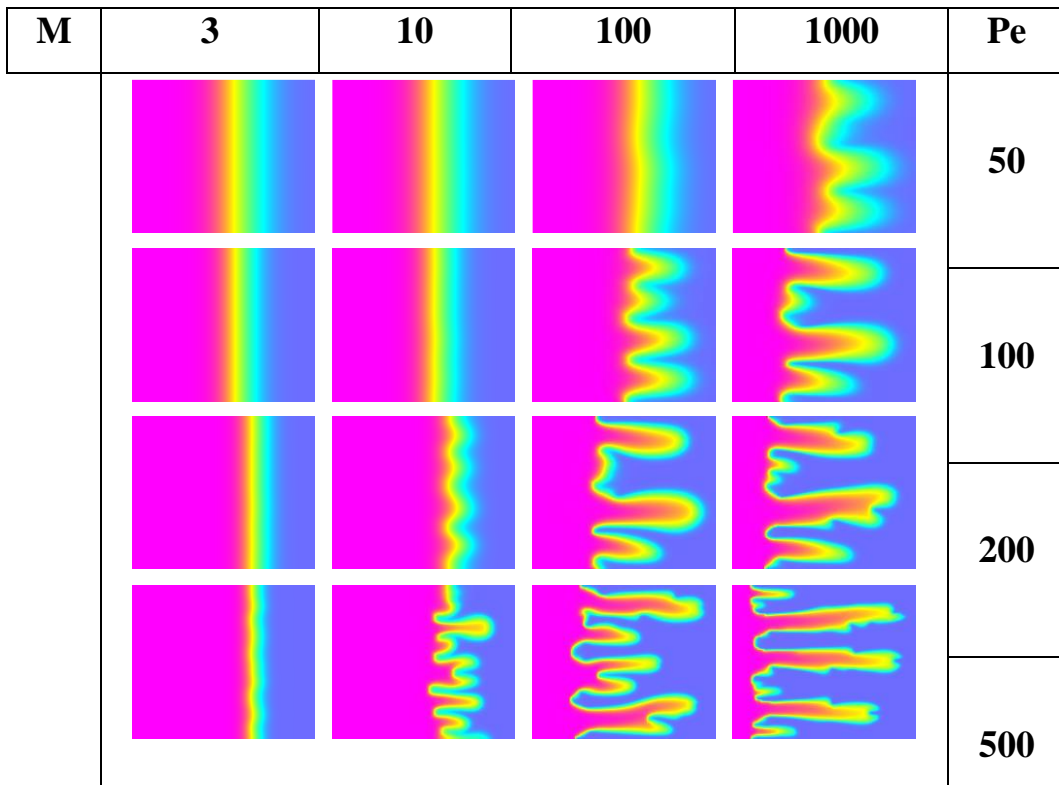
$$\overline{f(\dot{s}_j)\dot{\mathbf{v}}} = F(s, M, Pe)\mathbf{v} - \mathbf{D}(s, \mathbf{v}, M, Pe) \cdot \nabla s \quad (1.8.1)$$

$$M = \frac{\mu_2}{\mu_1}, \quad Pe = \frac{|\mathbf{v}|H}{d} \quad (1.8.2)$$

$$d = \left| K \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \frac{dp_c}{ds} \right| \quad (1.8.3)$$

Выражение (8.3) показывает, каким образом оценивается характерная диффузия, возникающая за счет капиллярных эффектов; черта сверху означает осреднение этих данных по глобальной ячейке. Форма самой зависимости дополнительного скаляра F в конвективном члене и тензора D в дисперсионном члене, моделирующих дополнительные потоки, от указанных параметров, определяется характером неустойчивости и подлежит нахождению путем решения локальной задачи.

Зависимость картины вытеснения и толщины пальцев от отношения вязкостей M и числа Пекле Pe представлены на рис.1.24 и рис.1.25.



*Рис.1.24. Влияние параметров M и Pe на картину вытеснения.
Двухмерный случай.*

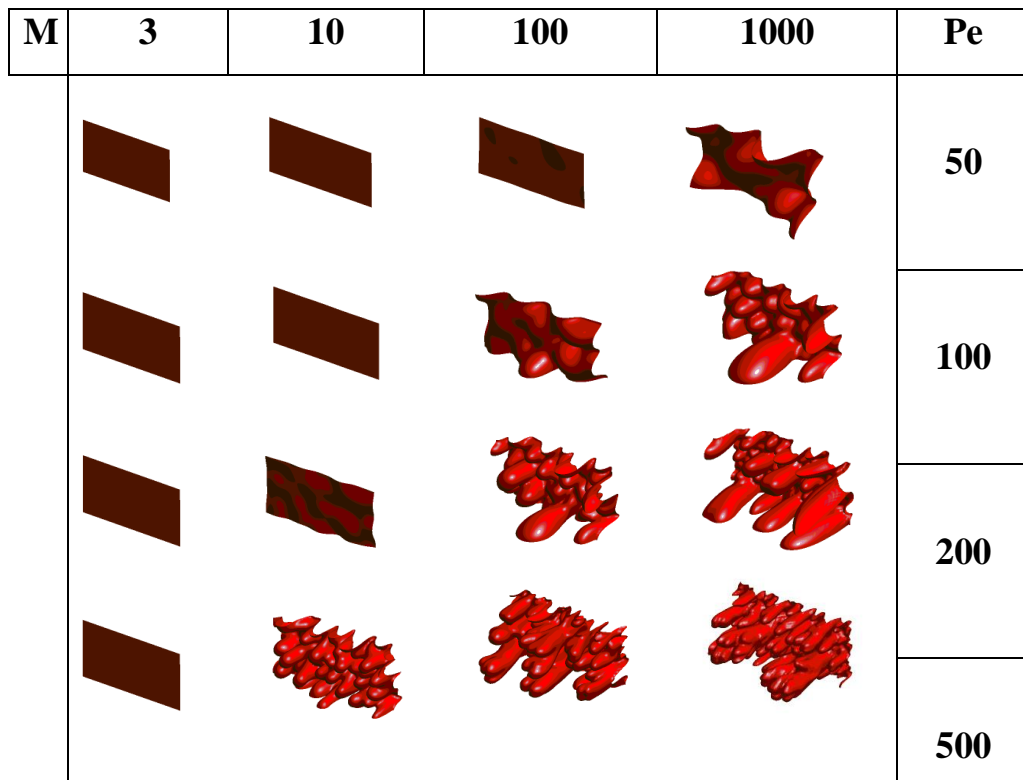


Рис.1.25. Влияние параметров M и Pe на картину вытеснения.

Трёхмерный случай.

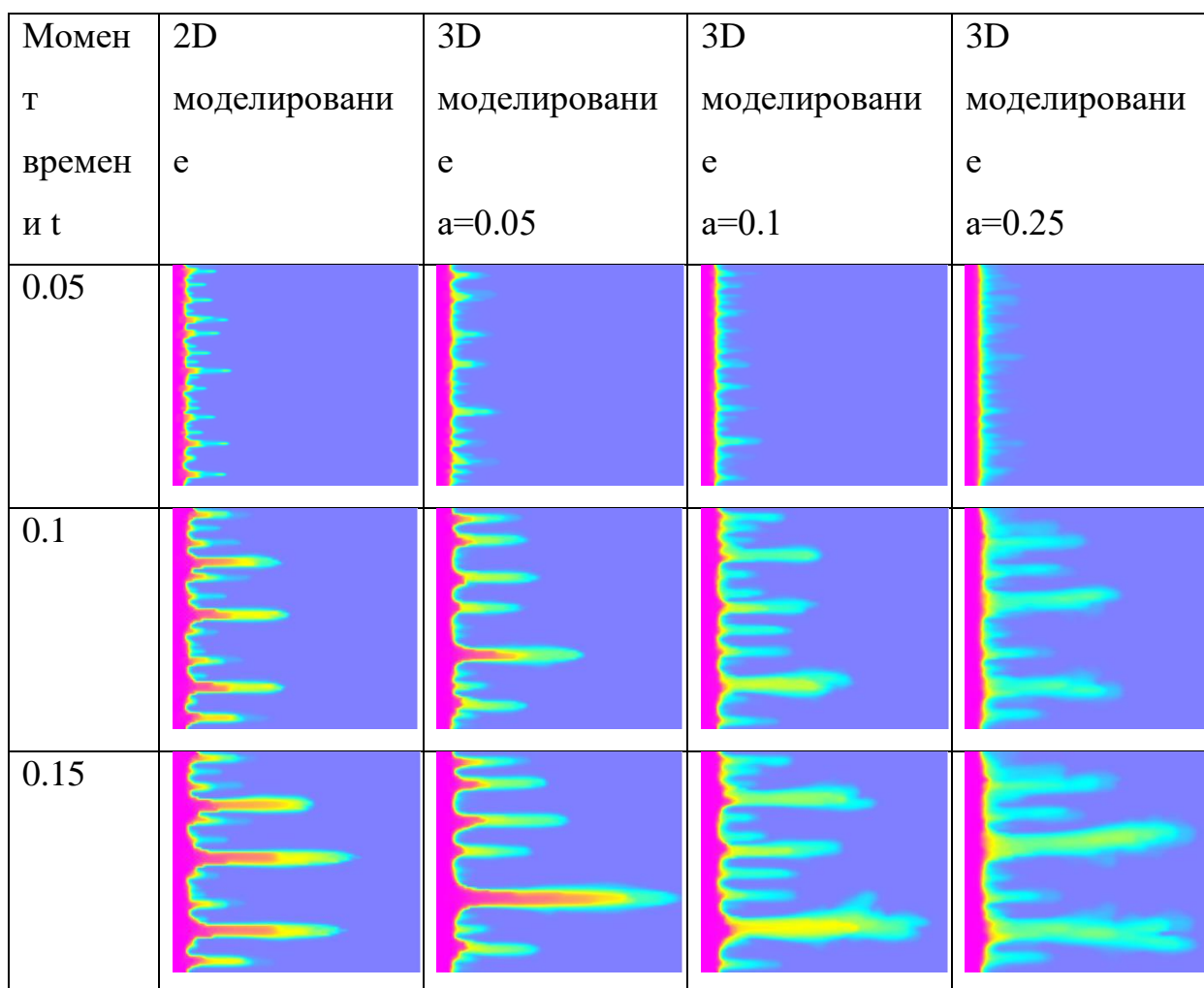


Рис.1.26. Сравнение картины вытеснения для 2D и 3D моделирования. a – отношение поперечного и продольного размера расчётной области.

На рис.1.26. приводится сравнение картины вытеснения для двухмерного и трёхмерных расчётов. Для трёхмерных расчётов показана средняя насыщенность по соответствующему поперечному сечению.

НР

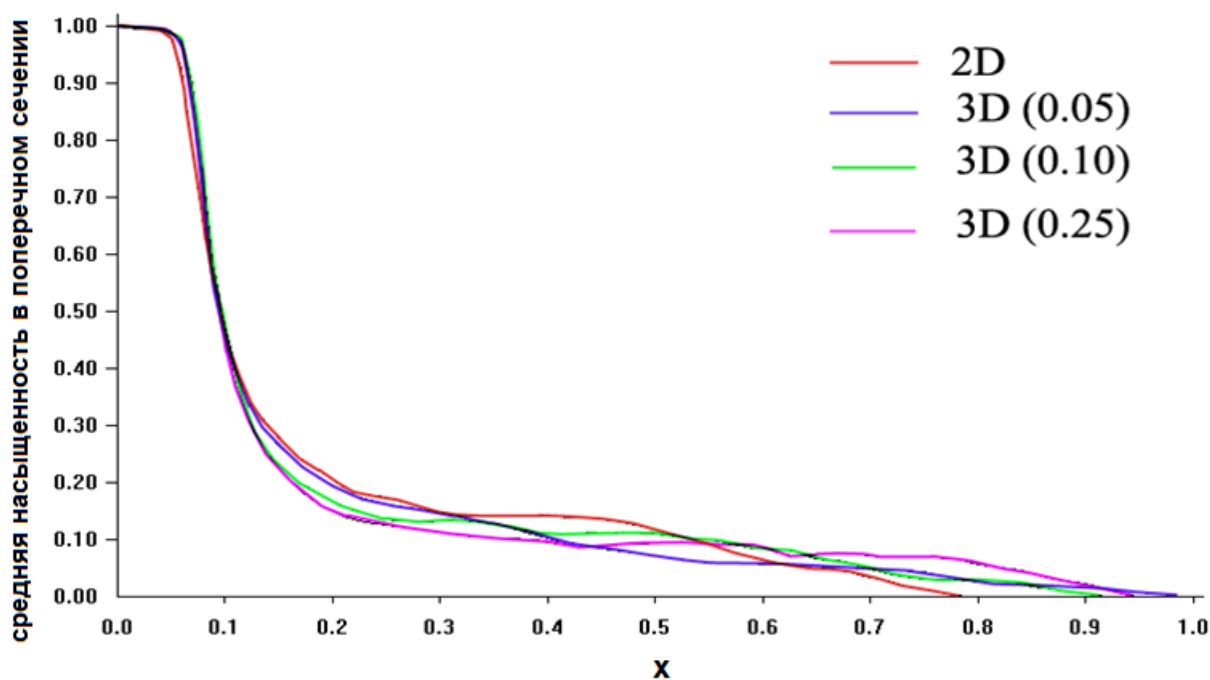


Рис.1.27. Сравнение результатов 2D и 3D моделирования.

Распределение средней по поперечному сечению насыщенности в зависимости от продольной координаты.

На рис.1.27 показана средняя насыщенность в поперечном сечении для двухмерного и трехмерных расчётов. Как видно из рис.1.26 и рис.1.27 отличие трёхмерного от двухмерного расчёта не превосходит 10%. Таким образом, целесообразно проводить двухмерные расчёты, так как затрачиваемые вычислительные мощности при трёхмерном моделировании значительно превышают вычислительные мощности требуемые для двухмерного моделирования, при этом трёхмерное моделирование не приводит к повышению точности результата.

Предлагаемый способ предполагает создание программного комплекса, предназначенного прежде всего для определения параметров алгебраической модели эффектов мелкомасштабной неустойчивости. Это достигается путем решения двух задач – локальной (мелкомасштабной) и глобальной (задачи с крупными расчетными ячейками). Алгоритм состоит из нескольких блоков: локальное построение сетки, локальное построение начального состояния, локальный расчет (последовательность шагов по времени), постпроцессор

локальных расчетов (собственно формирование потоков, моделирующих неустойчивость на микроуровне); глобального построения сетки, глобального построения начального состояния, глобального расчета (шагов по времени). Дополнительный блок – постпроцессор, обрабатывающий данные глобального моделирования. Все расчетные блоки можно подразделить на две крупных группы: локальную (расчет на микроуровне и получение дополнительных потоков) и глобальную (расчет на макроуровне с применением членов, моделирующих особенности течения на микроуровне).

Последовательность работы алгоритма, в том случае, когда решение локальной задачи интегрировано в глобальную, изображена в виде блок-схемы на рис.1.19.

Подробности работы таковы:

- Вначале строится глобальная сетка под цели расчета крупномасштабной задачи вытеснения.
- Затем для работы локального блока строится сетка, моделирующая типичную ячейку глобальной сетки как рабочую область.
- Формируется диапазон возможных безразмерных параметров локальной задачи и контрольные точки в фазовом пространстве этих параметров внутри этого диапазона. Параллельно на локальной сетке проводятся расчеты для различных вариантов (строятся начальные условия, проводятся шаги по времени, формируется результат в виде профиля насыщенности и потоков компонент на входе и выходе). Для этого используются модуль построения начального состояния локальной задачи и модуль ее решения.
- Затем модуль постпроцессора локальной задачи обрабатывает полученные результаты, формируя интерполяционную зависимость результатов локальной задачи от введенных параметров. В зависимости от полученных данных такая

зависимость представляется либо простым алгебраическим соотношением, в котором следует лишь определить коэффициенты, либо (в общем случае) табличными данными, которые могут быть интерполированы локально различными методами: сплайн с привязкой к точным значениям (для регулярного расположения полученных данных), сплайн без таковой привязки с минимальным средне-квадратичным отклонением (для менее регулярного их расположения), использование функций радиального базиса (для случая хаотично или неравномерно расположенных данных в фазовом пространстве большой размерности).

- Затем полученные данные используются при решении глобальной задачи, в модулях которой – построения начального состояния и решения – вводятся дополнительные потоки, сформированные моделированием неустойчивости на микроуровне.

В качестве решателя глобальной задачи может быть использован как собственный решатель, так и любой существующий решатель для задач подземной гидродинамики.

Применение нового метода позволит:

1. Создать программное обеспечение для предсказательного моделирования неустойчивого вытеснения нефти из природных коллекторов;
2. Провести компьютерный анализ и автоматизированную обработку результатов численных экспериментов;
3. Разработать функциональные формы и таблицы коэффициентов для описания динамики эволюции зоны взаимного проникновения жидкостей и ее структуры;
4. Создать приложение, совместимое с коммерческими гидродинамическими симуляторами и улучшающего качество моделирования вытеснения;

1.6. Вытеснение вязкой жидкости из пористой среды с учётом химических взаимодействий между фазами.

В мире активно развиваются инновационные методы разработки месторождений трудноизвлекаемых углеводородов. В условиях «нефтегазовой» экономики ключевая стратегическая проблема — это разработка отечественных технологий разведки и добычи нефти и газа, обеспечивающих минимально возможную стоимость единицы продукции. В процессе разработки различных стратегий повышения коэффициента извлечения нефти важную роль может играть предсказательное моделирование подземной гидродинамики с учетом внешних активных воздействий на пласт: механических, термических, химических и комбинированных. Одни из самых перспективных методов увеличения нефтеотдачи пласта – термохимические, которые характеризуются закачкой в пласт нагретого вытесняющего агента (например, смесь газа и воды). Нагретый кислород или воздух вступает в реакцию с углеводородом (рис.2.1.), в результате чего происходит его окисление с выделением тепла; в качестве продуктов химической реакции образуются углекислый газ и водяной пар. Реакция эта экзотермическая, и в результате её температура флюида повышается, а вязкость падает, в результате чего ускоряется процесс вытеснения нефти из пласта.

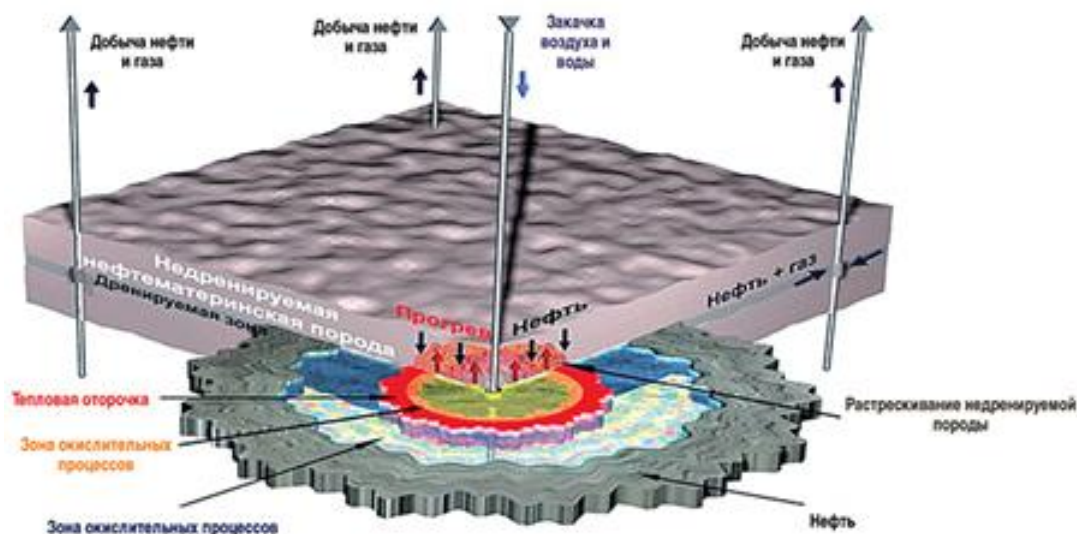


Рис.1.28. Термогазовый метод нефтедобычи.

В случае, когда между вытесняющей и вытесняемой фазами происходят химические реакции, большое влияние на процесс начинает оказывать неустойчивость вытеснения, так как происходит увеличение площади контактной поверхности между реагирующими веществами. Поэтому важным является учёт неустойчивости (в том числе мелкомасштабной) при моделировании таких процессов. Таким образом, роль фундаментальных исследований неустойчивого вытеснения вязких жидкостей из пористой среды с учётом термохимических реакций между фазами путем многомасштабного моделирования трудно переоценить.

1.6.1. Математическое моделирование химических взаимодействий в пористой среде с учетом нерегулярности границы контакта между фазами.

Рассматривается трёхфазный (нефть, вода и газ) поток сквозь пористую среду. Пористость и проницаемость среды будем считать постоянными, капиллярным давлением пренебрежём. Запишем уравнения баланса массы для каждой фазы с учётом дополнительных факторов связанных с размытием фронта за счёт неустойчивости вытеснения и диффузии:

$$\frac{\partial \rho_k s_k \phi}{\partial t} + \nabla (\rho_k s_k v + \rho_k s_k F_k(s, M, Pe) v - \rho D(s, v, M, Pe) \nabla s_k) = \dot{m}_k(T, Y_{O_2}, s_i),$$

$$\rho = \sum_k \rho_k s_k; \sum_k \rho_k s_k F_k(s, M, Pe) = 0$$

$$k = w, o, g;$$

Здесь

ρ_k – плотность фазы

s_k – насыщенность фазы

ϕ – пористость среды

w_k – скорость фильтрации фазы

\dot{m}_k – скорость рождения массы

Y_i – концентрация i -го компонента газовой фазы

В уравнении баланса массы коэффициент F_k отвечает за размытие фронта за счёт роста вязких пальцев, а коэффициент D – за размытие фронта за счёт механизмов перемешивания типа диффузии.

Коэффициенты F_k и D для различных значений отношения вязкостей M и числа Пекле Pe могут быть получены осреднением результата многомерного расчёта, подробно эта процедура описана в работе [106].

Значения функций F_k и D в зависимости от числа Пекле и от отношения вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей M представлены в таблицах 1.5 и 1.6 соответственно.

		Отношение вязкостей, M					
		84	20.1	7.39	4.48	3	1.65
Число Пекле, Pe	2048	0.552	0.212	0.1	0.055	0.031	0.029
	1024	0.496	0.187	0.108	0.046	0.035	0.005
	512	0.406	0.153	0.051	0.042	0.035	0
	256	0.269	0.063	0.105	0.035	0.024	0
	128	0.249	0.094	0.027	0.024	0	0
	64	0.114	0.031	0	0	0	0

Табл.1.5. Значения функции F_k

		Отношение вязкостей, M					
		84	20.1	7.39	4.48	3	1.65
Число Пекле,	2048	41.5	33	18.4	13.8	9.64	1.53
	1024	15.9	8.93	9.15	5.78	3.84	0.131
	512	15.3	6.72	5.44	2.08	1.36	0
	256	9.33	3.13	2.68	1.17	0.124	0
	128	3.89	2.06	0.463	0.29	0	0

	64	2.13	0.158	0.013	0	0	0
--	----	------	-------	-------	---	---	---

Табл.1.6. Значения функции D

Будем аппроксимировать значения из таблицы 1 функцией в следующем виде:

$$F = a_1 + a_2(M - 1)^\alpha + a_3(Re - 1)^\beta + a_4(M - 1)^\alpha(Re - 1)^\beta \quad (1.9)$$

Коэффициенты в (1.9) будем искать методом общего понижающего градиента (ОПГ):

a_1	a_2	a_3	a_4	α	β
-316.777	-443.782	316.7135	443.7819	0.52733	$1.65 \cdot 10^{-5}$

На рис.1.29. изображена функция (1.9), синими точками отмечены значения из таблицы 1.5.

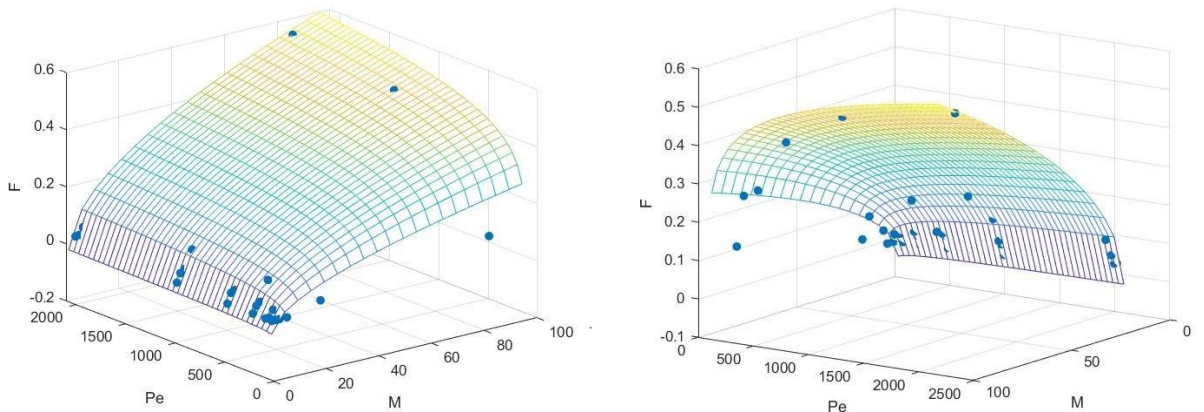


Рис.1.29. Функция F , связанная с размытием фронта в связи с развитием неустойчивости

Аналогично для функции D :

$$D = a_1 + a_2(M - 1)^\alpha + a_3(Re - 1)^\beta + a_4(M - 1)^\alpha(Re - 1)^\beta \quad (1.10)$$

Коэффициенты в (2) также будем искать методом общего понижающего градиента (ОПГ):

a_1	a_2	a_3	a_4	α	β
0	0	0	0.088333	0.155999	0.716540414

На рис.1.30 изображена функция (1.10), синими точками отмечены значения из таблицы 1.6.

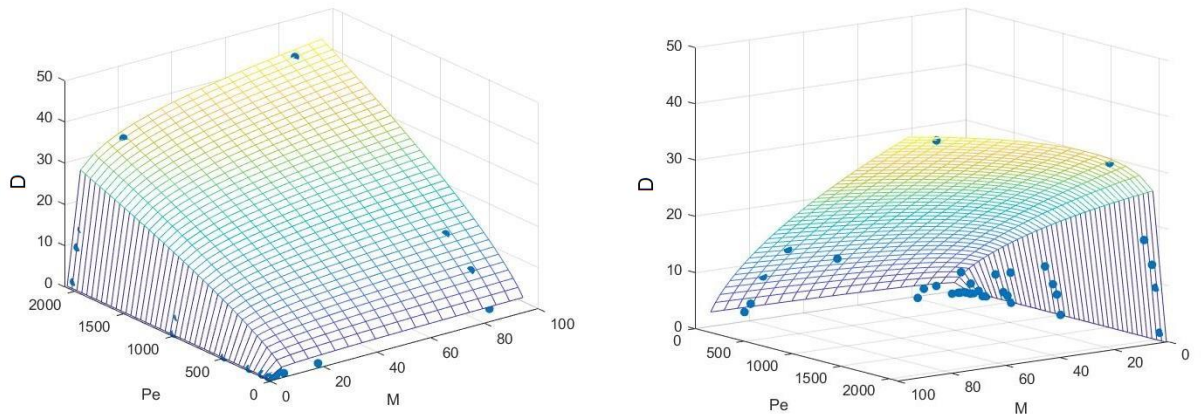


Рис.1.30. Функция D , связанная с размытием фронта в связи с диффузией

Запишем уравнения баланса массы для каждого компонента газовой фазы:

$$\frac{\partial Y_i \rho_g(p, T, Y_j) s_g \varphi}{\partial t} + \nabla(Y_i \rho_g v_g) = \dot{m}_i(T, Y_{O_2}, s_i), i = N_2, O_2, CO_2, H_2O(g);$$

А также уравнения баланса импульса в форме закона Дарси:

$$\vec{v}_k = -\frac{k k_{rk}}{\mu_k} \nabla p$$

k_{rk} – относительная проницаемость k -ой фазы

Уравнения притока тепла для скелета и потока:

$$\frac{\partial(1 - \phi) \rho_s E_s(T_s)}{\partial t} = -\nabla q_s(T_s) - \Delta Q(T, T_s);$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi \rho E(p, T, s_k, Y_j)}{\partial t} + \nabla \left(\sum_{k=w,o,g} \rho_k v_k s_k e_k(T) \right) \\ = -\nabla q(T) + \Delta Q(T, T_s) + \Delta Q_r(\dot{\omega}); \end{aligned}$$

Где

$E_s(T_s), E(p, T, s_i, Y_j)$ — внутренняя энергия скелета и флюида соответственно
 $q_i = \phi \sum_{i=w,o,g} \kappa_i s_i \nabla T, q_s = (1 - \phi) \kappa_s \nabla T_s$ — вектор притока тепла через поверхность к флюиду и скелету соответственно

$\Delta Q(T, T_s) = C(T_s - T)$ — теплообмен между скелетом пористой среды и флюидом

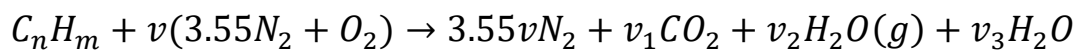
$\Delta Q_r = \dot{m}_{O_2} \Delta H$ — поток тепла за счёт химической реакции

$\Delta H = e_w - e_o - e_{gN_2} Y_{N_2} - e_{gO_2} Y_{O_2} + e_{gH_2O(g)} Y_{H_2O(g)} + e_{gCO_2} Y_{CO_2}$

$e_i(T, Y_j)$ — внутренние энергии фаз

Также будем учитывать коэффициент F при моделировании скорости зарождения массы \dot{m}_i :

В скважину закачивается смесь азота и кислорода. Предполагается следующая сборка реакций:



Баланс устанавливается при следующих предположениях:

$$\nu = n + 0.25m, \quad \nu_1 = n, \quad \nu_2 = \nu_3 = 0.25m$$

Скорость реакции:

Скорость реакции: $\dot{\omega} = \kappa(T) Y_{O_2} (1 + G(s_g, s_o, M_{go}, Pe))$

$$\kappa(T) = \begin{cases} 0, & T < T_r \\ \Lambda e^{-\frac{T_a}{T}}, & T \geq T_r \end{cases}$$

$\kappa(T)$ - коэф. скорости реакции по 3-ну Аррениуса

$$\kappa(T) = \begin{cases} 0, & T < T_r \\ \Lambda e^{-\frac{T_a}{T}}, & T \geq T_r \end{cases}$$

здесь Λ – предэкспоненциальный множитель, T_a - температура активации, T_r - пороговая температура

Функцию G определим следующим образом:

$$G(s_g, s_o, M_{go}, Pe) = C s_g s_o (1 + f(M_{go} - 1)(1 + g(Pe - 1)))$$

$$f(M_{go} - 1) = \begin{cases} A(M_{go} - 1)^\alpha, & M_{go} > 1 \\ 0, & M_{go} \leq 1 \end{cases}$$

$$g(M_{g0} - 1) = \begin{cases} B(Pe - 1)^\beta, & Pe > 1 \\ 0, & Pe \leq 1 \end{cases}$$

В дальнейших расчётах для простоты использовалась зависимость скорости реакции от коэффициента F в следующей форме:

$$\dot{\omega} = \kappa(T)Y_{O_2}s_g s_o(1 + eF)$$

Будем использовать следующие выражения для скорости зарождения массы фаз и компонент:

$$\begin{aligned} \dot{m}_w &= \dot{m}_{H_2O} = \dot{\omega}v_2W_{H_2O}, & \dot{m}_{N_2} &= 0 \\ \dot{m}_g &= \dot{m}_{N_2} + \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O(g)}, & \dot{m}_{O_2} &= -\dot{\omega}vW_{O_2} \\ \dot{m}_o &= -\dot{m}_w - \dot{m}_g, & \dot{m}_{CO_2} &= \dot{\omega}v_1W_{CO_2} \\ & & \dot{m}_{H_2O(g)} &= \dot{\omega}v_2W_{H_2O(g)} \end{aligned}$$

Здесь Wi — молярные массы соответствующих веществ

Начальные условия:

$$\begin{aligned} s_w &= s_{w0}, s_o = s_{o0}, s_g = 0, Y_{N_2} = 0, Y_{O_2} = 0, Y_{CO_2} = 0, Y_{H_2O(g)} = 1 \\ T &= T_s = T_0 = const \end{aligned}$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} p(0) &= p_1, p(L) = p_2 \\ s_k(0) &= s_{kb}, \frac{\partial s_k}{\partial x}(L) = 0, \\ Y_{N_2}(0) &= Y_{N_2b}, Y_{O_2}(0) = Y_{O_2b}, Y_{CO_2}(0) = 0, Y_{H_2O(g)}(0) = 0 \\ T(0) &= T_s(0) = T_1, \frac{\partial T}{\partial x}(L) = 0, \frac{\partial T_s}{\partial x}(L) = 0 \end{aligned}$$

Расчёт фазовых плотностей

Плотность каждой компоненты $\rho_i(p, T)$ линейно зависит от давления и обратно пропорциональна температуре, которые являются единичными для всех компонент:

$$\begin{aligned} \rho_w &= \frac{\rho_{0H_2O} + \alpha_{0H_2O}^{-2}(p - p_0)}{1 + \beta_w(T - T_0)}, \quad \rho_o = \frac{\rho_{0CnHm} + \alpha_{0CnHm}^{-2}(p - p_0)}{1 + \beta_o(T - T_0)}, \\ \rho_g &= \frac{p}{RT} \left(\frac{Y_{N_2}}{W_{N_2}} + \frac{Y_{O_2}}{W_{O_2}} + \frac{Y_{CO_2}}{W_{CO_2}} + \frac{Y_{H_2O(g)}}{W_{H_2O(g)}} \right)^{-1} \end{aligned}$$

Расчёт фазовых коэффициентов вязкости

Скорости фаз обратно пропорциональны фазовым вязкостям. Для описания модели вязкости компонент углеводородной и жидкой фаз используются соотношения Бачинского:

$$\frac{A_w}{\mu_w} = \frac{1}{\rho_w} - B_w, \quad \frac{A_o}{\mu_o} = \frac{1}{\rho_o} - B_o$$

Формула Сазерленда для компонент газовой фазы:

$$\mu_i = A_i \frac{T_0 + C_i}{T + C_i} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \quad i = N_2, CO_2, O_2, H_2O(g)$$

Вязкость газовой фазы находится из соотношения Аррениуса:

$$\ln \mu_g = x_{N_2} \ln \mu_{N_2} + x_{O_2} \ln \mu_{O_2} + x_{CO_2} \ln \mu_{CO_2} + x_{H_2O(g)} \ln \mu_{H_2O(g)}$$

Где $x_i = \frac{Y_i/W_i}{\sum Y_i/W_i}$ — мольная доля соответствующего вещества.

Проведём не сложные арифметические операции и получим:

$$\mu_g = (\mu_{N_2})^{x_{N_2}} * (\mu_{O_2})^{x_{O_2}} * (\mu_{CO_2})^{x_{CO_2}} * (\mu_{H_2O(g)})^{x_{H_2O(g)}}$$

Расчёт относительных проницаемостей

Относительные проницаемости характеризуют способность одной фазы протекать через другую. Рассмотрим модель Бэкера для относительных проницаемостей

$$k_{rw} = \frac{(s_o - s_{or})k_{rwo} + (s_g - s_{gr})k_{rwg}}{(s_o - s_{or}) + (s_g - s_{gr})},$$

$$k_{ro} = \frac{(s_w - s_{wr})k_{row} + (s_g - s_{gr})k_{rog}}{(s_w - s_{wr}) + (s_g - s_{gr})},$$

$$k_{rg} = \frac{(s_w - s_{wr})k_{rgw} + (s_o - s_{or})k_{rgo}}{(s_w - s_{wr}) + (s_o - s_{or})}$$

k_{rij} — относительная проницаемость в соотв. двухфазных потоках по модели Брукса-Кори:

$$k_{rog}(s_o) = (S_o^*)^4, \quad k_{rgo}(s_o) = (1 - S_o^*)^2(1 - (S_o^*)^2),$$

$$S_o^* = \frac{s_o - s_{or}}{1 - s_{or} - s_{wr}}$$

$$k_{rwo}(s_w) = (S_w^{*(w-o)})^4, \quad k_{row}(s_w) = (1 - S_w^{*(w-o)})^2(1 - (S_w^{*(w-o)})^2),$$

$$S_w^{*(w-o)} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$$

$$k_{rwg}(s_w) = (S_w^{*(w-g)})^4, \quad k_{rgw}(s_w) = (1 - S_w^{*(w-g)})^2 (1 - (S_w^{*(w-g)})^2),$$

$$S_w^{*(w-g)} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{or}}$$

Расчёт внутренней энергии.

Внутренняя энергия фаз и скелета рассчитываются следующим образом:

$$e_o = \int_{T_r}^T c_o dT + H_o^r = c_o(T - T_r) + H_o^r, \quad e_w = \int_{T_r}^T c_w dT + H_w^r$$

$$= c_w(T - T_r) + H_w^r,$$

$$e_{g_j} = \int_{T_r}^T c_{V_j} dT + H_j^r = c_{V_j}(T - T_r) + H_j^r, \quad j = N_2, O_2, CO_2, H_2O(g)$$

$$e_g = \sum_{j=N_2, O_2, CO_2, H_2O(g)} (c_{V_j}(T - T_r) + H_j^r) Y_j,$$

$$E_s = \int_{T_r}^T c_s dT + H_s^r = c_s(T_s - T_r) + H_s^r$$

1.6.2. Результаты численного моделирования процесса вытеснения с применением термогазового метода в одномерной постановке с учётом неустойчивости вытеснения.

На рис.1.31 представлены результаты расчетов при разных значениях коэффициентов F и D, отвечающих за размытие фронта за счет роста «вязких пальцев» и диффузии. Красная кривая показывает случай, когда коэффициенты равны нулю и не учитываются дополнительные факторы, связанные с неустойчивостью перемещений. Зеленая кривая (F=0,187 и D=8,93) и коричневая кривая (F=20 и D=20) практически совпадают с красной кривой, поэтому при таких значениях коэффициентов размытие фронта не оказывает существенного влияния на динамику вытеснения. В то же время, если значительно увеличить значения коэффициентов F и D, вытеснение будет

происходить значительно быстрее, например, при $F=200$ и $D=200$ (желтая кривая) содержание нефти достигает 40% примерно в 2 раза быстрее, чем в случае, когда неустойчивость не учитывается.

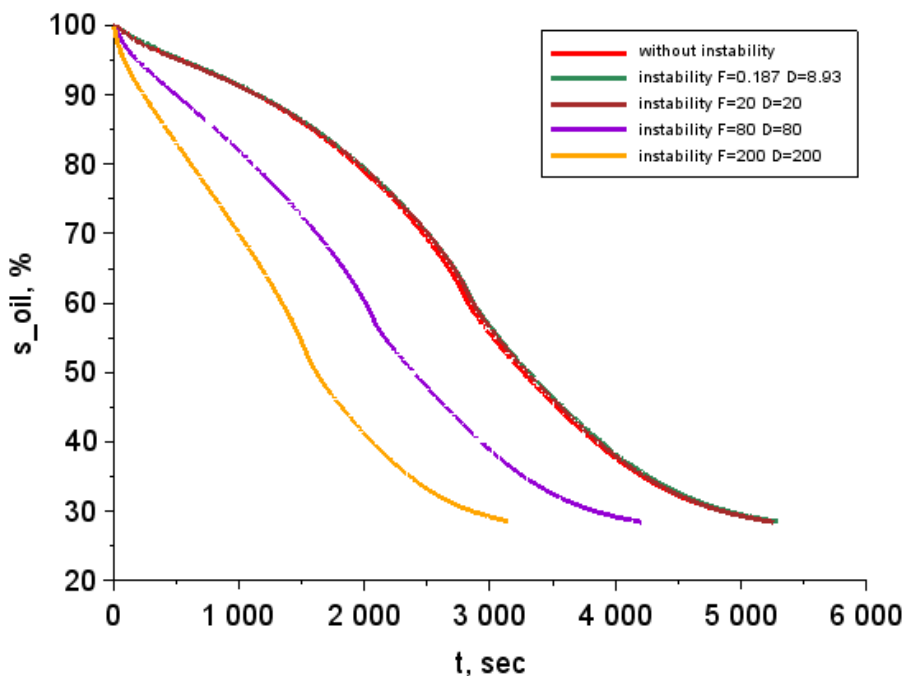


Рис.1.31. Содержание нефти в рассматриваемой области для расчетов с различными значениями F и D

На рис.1.32. показаны результаты расчетов с химическими реакциями и без них. Зеленая и красная кривые показывают случай, когда расчет проводился без дополнительных факторов, связанных с неустойчивостью вытеснения. В случае наличия химических реакций (зеленая кривая) вытеснение происходит значительно быстрее, например, содержание нефти 50% достигается за 3500 с, а при отсутствии химических реакций (красная кривая) за 5500 с. Аналогичный результат получен для случая учета дополнительных факторов, связанных с неустойчивостью: желтая и фиолетовая кривые. Ускорение процесса вытеснения связано в данном случае со снижением вязкости нефти за счет экзотермической химической реакции между вытесняющей и вытесняемой фазами. Таким образом, термогазовый метод повышения нефтеотдачи пластов является высокоэффективным.

Также следует отметить, что в случае, когда не учитываются химические реакции, расчеты с дополнительными факторами, связанными с неустойчивостью, и без них практически совпадают (фиолетовые и красные кривые соответственно). В то же время для расчетов с химическими реакциями (желтая и зеленая кривые) учет размытия фронта из-за неустойчивости существенно влияет на динамику вытеснения. Таким образом, при моделировании процесса вытеснения жидкости из пористой среды с учетом химических взаимодействий между фазами необходимо учитывать дополнительные члены в уравнении, связанные с размытием фронта из-за неустойчивости

вытеснения.

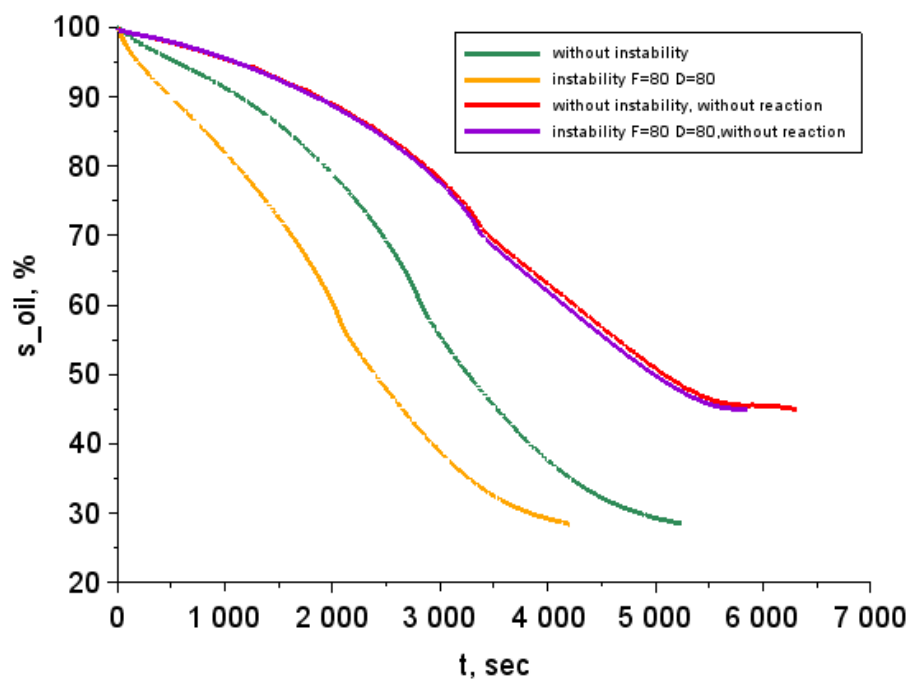


Рис.1.32. Сравнение результатов расчетов с химическими реакциями и без них

На рис. 1.33 продемонстрировано влияния коэффициента D на динамику вытеснения. Графики показывают общее содержание нефти во всей расчётной области в зависимости от времени для различных значений коэффициента D , коэффициент F при этом фиксирован. В случае, когда химические реакции отсутствуют, учёт дополнительных факторов не оказывает существенного

влияния на динамику вытеснения. В случае, когда химические реакции присутствуют, увеличение коэффициента D приводит к ускорению процесса.

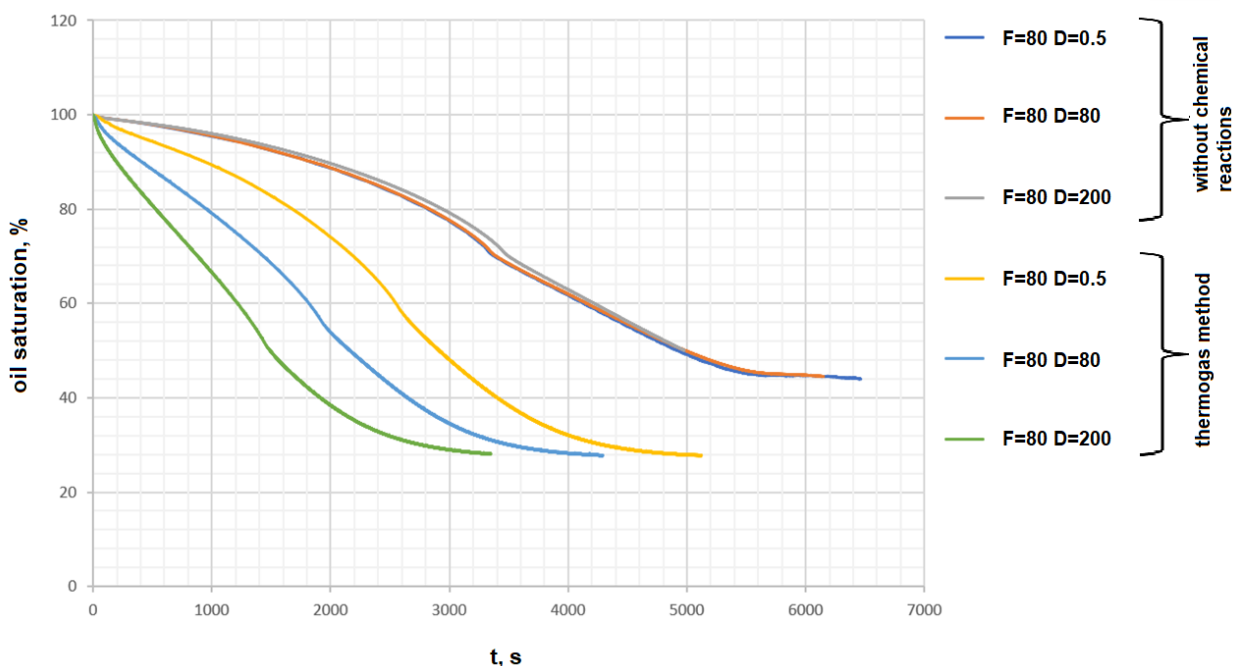


Рис.1.33. Влияние параметра D на динамику вытеснения в случае наличия и отсутствия химических реакций

На рис. 1.34 продемонстрировано влияния коэффициента F на динамику вытеснения. Графики показывают общее содержание нефти во всей расчётной области в зависимости от времени для различных значений коэффициента F , коэффициент D при этом фиксирован. Как с химическими реакциями, так и без них, увеличение F приводит к незначительному ускорению фронта вытеснения. Стоит отметить, что для случая, когда химические реакции отсутствуют, вытеснение происходит медленнее и коэффициент вытеснения нефти ниже (56%), чем для случая термогазового метода (72%).

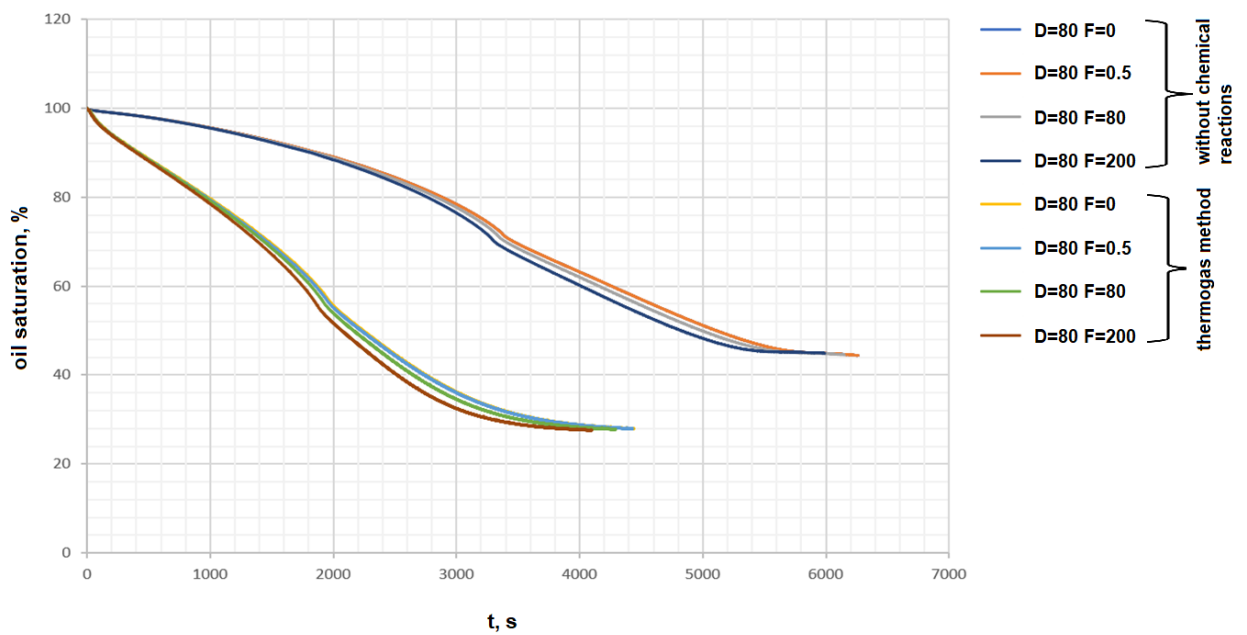


Рис.1.34. Влияние параметра F на динамику вытеснения в случае наличия и отсутствия химических реакций

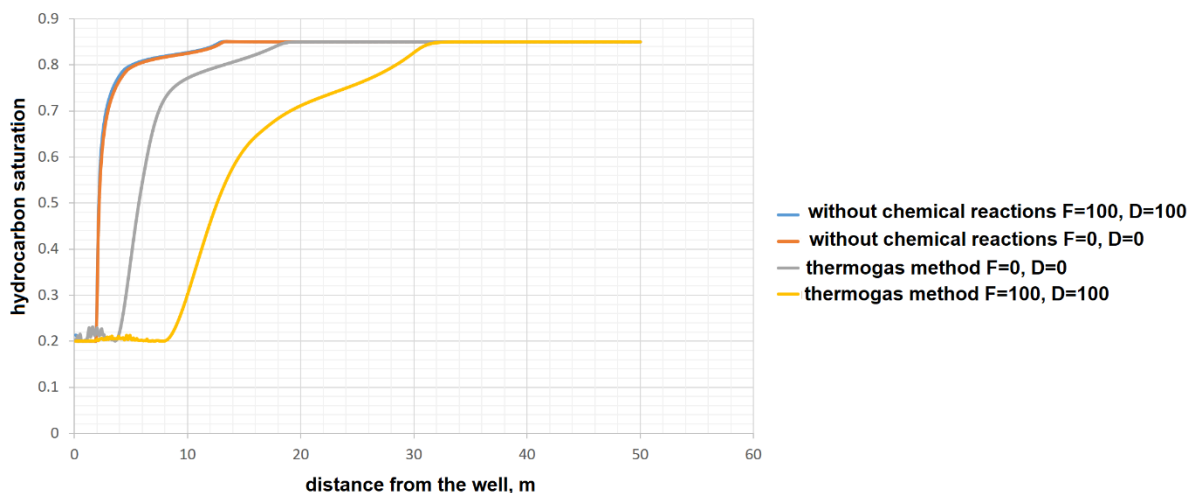


Рис.1.35. Влияние химических реакций и неустойчивости на размытие фронта вытеснения

На рис. 1.35 показана зависимость насыщенности нефти от координаты. Видно, что в случае отсутствия химических реакций добавление потоковых членов (красная и синяя кривые), связанных с неустойчивостью не приводит к существенному изменению. Если происходят химические реакции, фронт вытеснения растягивается и ускоряется процесс вытеснения (серая кривая). При этом добавление потоковых членов приводит к ещё большему размытию фронта и ускорению вытеснения.

1.7. Выводы к первой главе.

1. В результате сравнительного анализа данных обработки экспериментальных исследований, были показаны возможности для определения неизвестных параметров модели, а именно капиллярных характеристик горных пород и насыщающих жидкостей. На основании экспериментальных данных определены коэффициенты в математических моделях и исследовано развитие фронта вытеснения для различных параметров.
2. Предложен новый метод для подсчёта площади изоповерхностей. Данный метод можно применять для расчёта площади нерегулярных межфазовых поверхностей при моделировании неустойчивого вытеснения из пористой среды. Проведён анализ эволюции поверхности раздела фаз для расчётов с различными определяющими параметрами в том числе для расчётов соответствующим экспериментам.
3. Было показано, что в случае, когда отношение вязкостей жидкостей около 1, вытеснение близко к поршневому. Неустойчивость в этом случае не развивается, случайные отклонения от плоской формы сглаживаются стабилизирующими факторами. В случае, когда отношение вязкостей больше 1, развивается неустойчивость и площадь поверхности раздела жидкостей увеличивается, затем достигнув некоторого максимального значения, после прорыва первого «вязкого пальца» резко падает.
4. Показано, что чем выше значение отношения вязкостей, тем большего значения достигает площадь раздела фаз. Также показано, что неустойчивость фронта возрастает с ростом числа Пекле и для фильтрации при постоянном перепаде давления, чем выше перепад давления, тем сильнее развивается неустойчивость, а фронт доходит до границы быстрее.

5. Предложен новый метод учёта подсеточной неустойчивости при моделировании процессов поземной гидромеханики, направленный на повышение точности расчетов и сокращение времени их проведения при построении реальной модели прогнозирования протекания процессов в нефтесодержащих пластах. Метод заключается в изменении модели на макроуровне за счёт дополнительных потоков в уравнениях в зависимости от физических свойств, полученных при исследовании процесса на микроуровне.
6. Показано, что отличие распределения насыщенности в расчётной области для двухмерных и трёхмерных расчётов не превосходит 10%.
7. Разработана математическая модель прогностического моделирования процесса вытеснения нефти термогазовым методом повышения нефтеотдачи. Модель позволяет учитывать подсеточную неустойчивость при двумерном или трехмерном моделировании процесса вытеснения, а также позволяет учесть размытие фронта за счёт дополнительных факторов, связанных с диффузией и неустойчивостью, даже при одномерном моделировании. Найдена явная приближенная функциональная форма для коэффициентов потока смешения и коэффициента диффузии.
8. Показано в численных экспериментах, 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. Это доказывает эффективность использования термогазового метода для повышения нефтеотдачи. Показано, что в случае вытеснения с учетом экзотермических химических реакций, на динамику вытеснения существенно влияют дополнительные факторы, связанные с подсеточной неустойчивостью.

ГЛАВА 2. Исследование капиллярных эффектов при пропитке пористой среды в условиях микрогравитации.^c

Изучение особенностей процессов фильтрации многофазных флюидов в условиях микрогравитации имеет большое значение как для развития космических технологий, так и для некоторых наземных приложений [171-174]. Хорошо известно, что поведение жидкости в условиях пониженной гравитации существенно отличается от поведения в земных условиях.

Near Earth Asteroid Rendezvous (NEAR) является примером миссии, на которую серьезно повлияло «нестандартное» поведение жидкости. Миссия была отложена на 13 месяцев из-за произошедшего инцидента: во время орбитального маневра топливная жидкость отреагировала более динамично, чем ожидалось (вышла за пределы предполагаемого рабочего диапазона, и корабль перешел в безопасный режим). В результате при коррекции курса

^c При подготовке данной главы диссертации использовались следующие публикации автора, в которых, согласно «Положению о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова», отражены основные результаты, положения и выводы исследования: 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. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.12.009; 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. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.06.054; 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. — стр. 629-639 — DOI: 10.1007/s12217-019-09733-7; 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; 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; 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*. — DOI: 10.5772/intechopen.93467; 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; Skryleva E.I., Nikitin V.F., Dushin V.R. Microgravity investigation of seepage flows in porous media // сборник *First IAA/AAS SciTech Forum on SPACE FLIGHT MECHANICS AND SPACE STRUCTURES AND MATERIALS*. — том 170. — стр. 729-739; 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*; 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; Скрылева Е.И. Исследование фильтрационных течений в пористых средах в условиях микрогравитации // *XII ВСЕРОССИЙСКИЙ СЪЕЗД ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ Сборник трудов* — 2019 — том 2 — Стр. 1247-1249; Проект «Модели многофазных сред и волновых процессов в природных, технических и социальных системах» Смирнов Н.Н., Стамов Л.И., Дьяков П.А., Захаров П.П., Зубков А.Ф., Ильюшина Е.А., Логвинов О.А., Малашин А.А., Маслов С.А., Михальченко Е.В., Никитин В.Ф., Рыбакин Б.П., Скрылева Е.И., Смирнова М.Н., Тюренкова В.В., Шамина А.А. // <https://istina.msu.ru/projects/323786154/>

NEAR отключился, и восстановить управление удалось только через 27 часов [118].

В условиях пониженной гравитации основной движущей силой течения жидкостей становятся капиллярные эффекты. Например, на борту космической станции подача жидкости из резервуара (например, топлива) возможна только за счет капиллярных сил. Также капиллярные эффекты играют важную роль в движении жидкостей в тепловых трубках систем терморегулирования космических аппаратов.

Многие биологические процессы, происходящие в живых организмах, связаны с процессом течения жидкости в пористых средах и тонких капиллярах. Хорошо известно, что условия пониженной гравитации оказывают огромное влияние на работу всех систем организма, самочувствие космонавтов, на регенерацию при травмах и ожогах. Поэтому фундаментальное изучение механических аспектов движения жидкости в условиях микрогравитации будет иметь большое значение для космической биомедицины.

Также результаты изучения процессов просачивания в условиях микрогравитации могут быть полезны при разработке системы выращивания растений для биорегенеративных систем жизнеобеспечения в космосе для длительных пилотируемых полетов. Успешное выращивание высших растений на космическом корабле позволит не только производить свежую пищу для экипажа, но и восстанавливать воздух за счет процесса фотосинтеза, а также восстанавливать воду в результате переработки отходов жизнедеятельности человека. Выращивание высших растений требует равномерного распределения воды и питательных веществ в корневой зоне. В условиях пониженной гравитации ключевую роль в этом процессе играют капиллярные эффекты. По этой причине изучение капиллярного впитывания в условиях микрогравитации имеет основополагающее значение для успешного выращивания растений на космических станциях.

Следует отметить, что результаты изучения процессов фильтрации в условиях микрогравитации могут найти применение и в земных технологиях и процессах, например, при добыче нефти. В процессе добычи углеводородов наблюдается многофазная фильтрация, возникающие капиллярные эффекты могут оказывать существенное влияние на качество нефтеотдачи. Изучение капиллярных эффектов в земных условиях затруднено из-за наличия силы земного притяжения, поэтому приходится прибегать к исследованиям в условиях микрогравитации, где эти эффекты можно наблюдать «в чистом виде». Фундаментальные исследования капиллярных сил позволят уточнить математические модели, описывающие фильтрационные процессы. Это позволит более качественно проводить численное моделирование для изучения эффективности применения тех или иных методов повышения нефтеотдачи, а также создавать цифровые двойники месторождений.

Экспериментальное изучение пропитки при параболических полетах дает уникальные возможности наблюдения за поведением жидкости под действием капиллярных сил: во-первых, в условиях земного притяжения капиллярные эффекты «маскируются» за земным притяжением; во-вторых, в наземных условиях капиллярная пропитка возможна только в средах с мелкими порами, что затрудняет визуализацию течения жидкости. Это делает чрезвычайно важным проведение таких экспериментов. Кроме того, результаты экспериментов позволяют верифицировать математические модели путем подбора эмпирических констант. Тем не менее исследовательские проекты на космической станции или во время параболических полетов дороги и сложны в реализации, поэтому разработка верифицированных программных комплексов для прогностического моделирования поведения жидкости в условиях микрогравитации является актуальной задачей.

2.1. Описание экспериментов по пропитке искусственной пористой среды во время параболических полётов и обработка экспериментальных данных.

2.1.1. Описание экспериментов

Согласно всемирному закону тяготения любое тело, обладающее массой, притягивается к Земле. В случае свободного падения тело движется в поле силы тяжести, но каждая частица этого тела вдоль всей траектории движения находится в состоянии невесомости. Таким образом, если самолет движется так, что результирующая действующих на него сил есть только сила тяжести, то все, что расположено внутри него, находится в состоянии невесомости. То есть теоретически вес тел уменьшается до нуля, на практике же, он колеблется около нуля с амплитудой, порядка одной сотой веса при нормальных условиях. Поэтому это явление и называется микрогравитацией.

Во время полета на самолет действуют четыре силы :

- сила тяжести, направленная вниз перпендикулярно поверхности Земли
- подъемная сила, направленная вверх перпендикулярно поверхности Земли
- лобовое сопротивление, направленная горизонтально и указывающая в конец самолета
- реактивная сила (сила тяги), направленная горизонтально и указывающая в начало самолета

Чтобы исключить влияние сил на самолет, отличных от силы тяжести, пилоту необходимо компенсировать лобовое сопротивление и реактивную силу, что не

вызывает трудностей. Также ему нужно уменьшить подъемную силу: для этого следует наклонить нос самолета вниз.

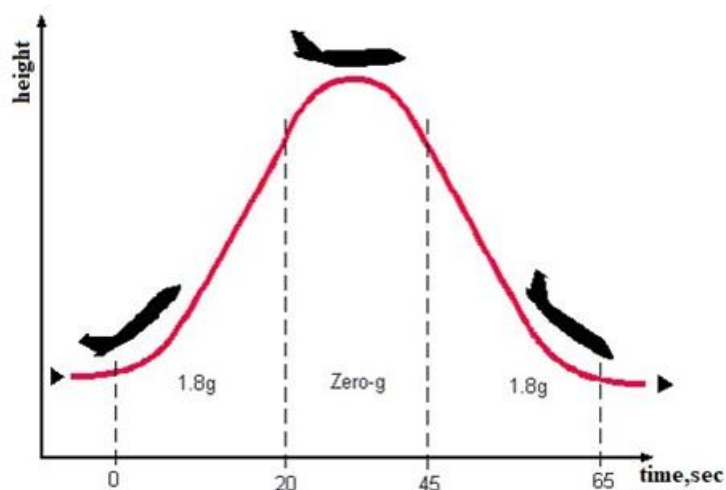


Рис.2.1.Параболический полёт.

Сам маневр можно условно разбить на несколько частей (рис.2.1):

- прямолинейное движение самолета до и после параболы.
- периоды перегрузки: до параболы, в течение которого самолет достигает необходимого угла атаки, и после – самолет уменьшает угол атаки до нулевого, чтобы продолжить прямолинейное движение.
- непосредственно сама парабола, в течение которой наблюдается состояние микрогравитации.

Для наибольшей длительности параболы (порядка 22-25 секунд) начальный угол баллистической траектории должен быть около 50 градусов.

Эксперименты по просачиванию смачивающей жидкости (воды) в искусственной пористой среде, состоящей из стеклянных сфер, проводились во время параболических полетов. Методы эксперимента подробно описаны в [109]. В данной главе сосредоточим наше внимание на особенностях фильтрации в среде, содержащей неоднородность проницаемости, а также на особенностях моделирования многократной пропитки(когда режим дренажа несколько раз сменяет режим пропитки). Зоны различной проницаемости моделировались в экспериментальных ячейках (рис. 2.2) с использованием стеклянных шариков разного диаметра. Пористые образцы были герметично упакованы внутри экспериментальной камеры, чьи размеры составляют $74 \times 50 \times 315$ мм³. Каждая ячейка имела отдельный резервуар для жидкости, изготовленный из деформируемого пластикового пакета. Экспериментальная

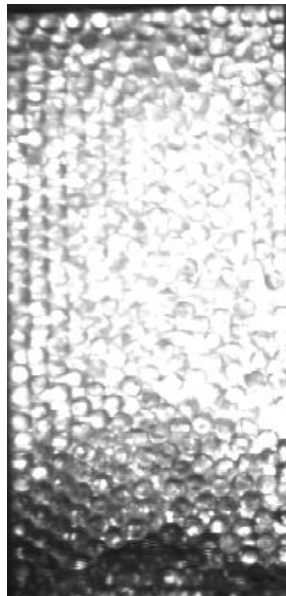
ячейка была соединена с цилиндрическим соединителем, имеющим длину 70 мм и служащим гидравлическим соединением между пористым образцом и резервуаром, заполненным смесью воды и красителя. Диаметр зоны канала был выбран достаточно большим, то есть 37 мм, чтобы обеспечить достаточную подачу жидкости в пористую среду в течение периодов микрогравитации. Во время полета капиллярная фильтрация была записана на видео с использованием высококачественного видеоманитоскопа. Система подсветки позволяла визуализировать границу раздела фаз воды и воздуха.



Рис. 2.2. Экспериментальная ячейка для искусственной пористой среды.

В процессе эксперимента рассматривалось три возможных конфигурации расположения шариков с различными диаметрами:

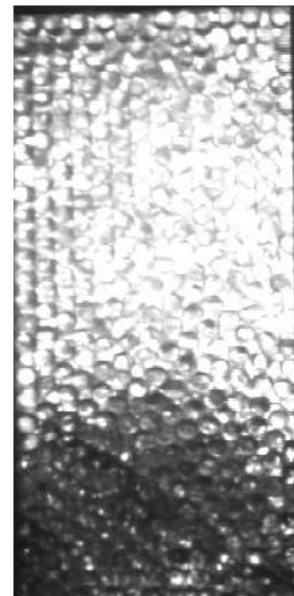
- 1) Вся ячейка заполнена шариками одного диаметра, среда считается однородной(рис.2.3)
- 2) Нижний слой состоит из шариков с одним диаметром, сверху насыпка с шариками другого диаметра (рис. 2.4)
- 3) Вся ячейка заполнена шариками одного диаметра, но внутри содержится вставка с шариками другого диаметра (рис. 2.5). Размер вставки $30 \times 20 \times 30$ (мм³).



t=0sec

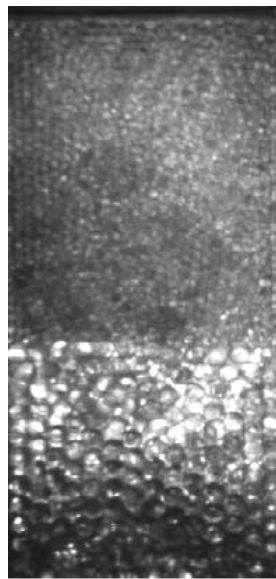


t=3sec

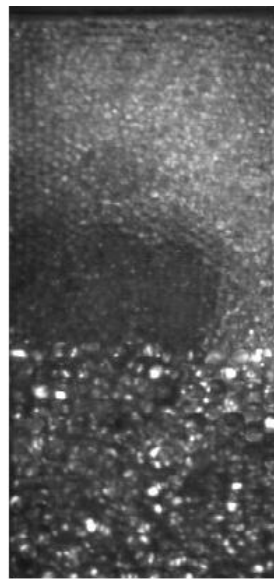


t=7sec

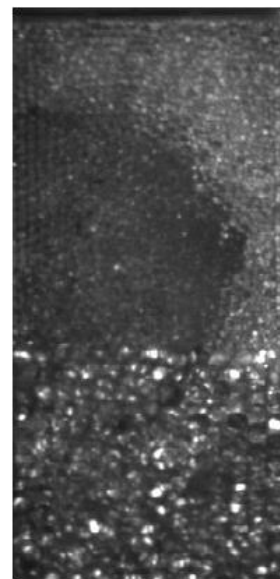
Рис 2.3. Течение жидкости в однородной пористой среде в условиях микрогравитации.



t=0sec



t=7sec



t=18sec

Рис 2.4. Течение жидкости в неоднородной пористой среде в условиях микрогравитации.

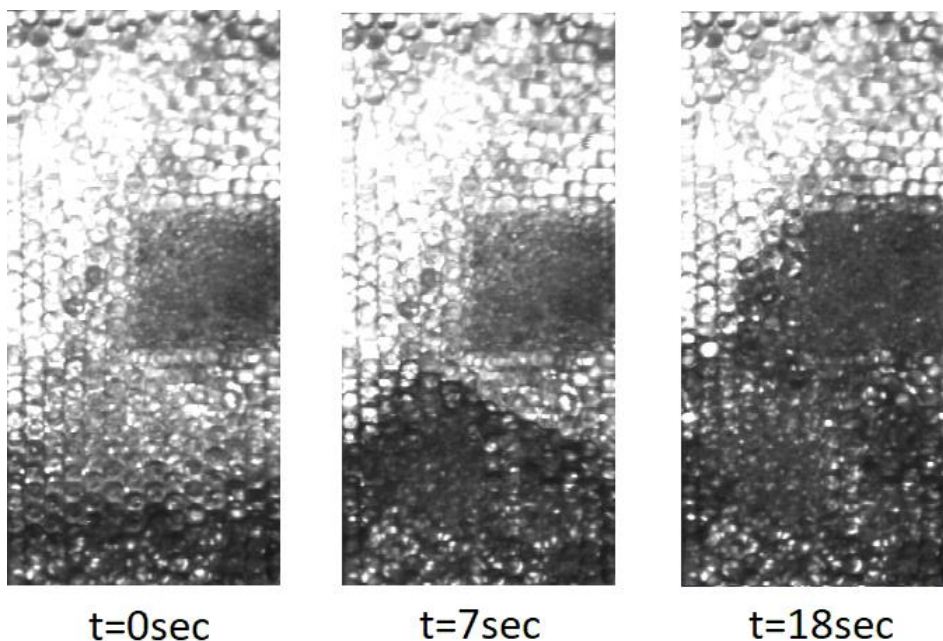


Рис 2.5. Течение жидкости в образце пористой среды, содержащим вставку с низкой проницаемостью в условиях микрогравитации.

Во всех случаях зоны с различной проницаемостью образовывали сферы диаметром 2 и 6 мм. Искусственная пористая среда внутри каждой зоны состояла из стеклянных шариков одинакового диаметра. Таким образом, проницаемость пористой среды, состоящей из сфер ($d = 6$ мм), составляла $K1 = 0,85 \cdot 10^{-8}$ м², тогда как проницаемость в зоне низкой проницаемости ($d = 2$ мм) составляла $K2 = 0,20 \cdot 10^{-8}$ м².

2.1.2. Обработка изображений

Как уже было сказано выше, в течение всего эксперимента ведется видеозапись капиллярной пропитки пористой среды. Впоследствии она разбивается на последовательность изображений формата .bmp в цветовом режиме «градация серого». Каждое изображение имеет разрешение 2.5 пикс/мм. Изначально течение жидкости изучалось по исходным изображениям, но было затруднено из-за недостаточной контрастности фотографий. Ниже описывается метод обработки снимков для облегчения исследования движения фронта жидкости.

Обработка проводилась в приложении Adobe Photoshop. Каждому изображению соответствует гистограмма, показывающее количество пикселей того или иного оттенка серого. Условно снимок можно разбить на

две зоны: более светлую, соответствующую еще не пропитанной пористой среде, и более темную, показывающую движение жидкости. На гистограмме это отражено в виде двух отдельно стоящих пиков. Гистограмма обычно сильно «зубчатая» (рис. 3.6). Чтобы ее сгладить, на изображение накладывается фильтр «размытие по поверхности» радиуса 5 пикс (рис. 3.7).

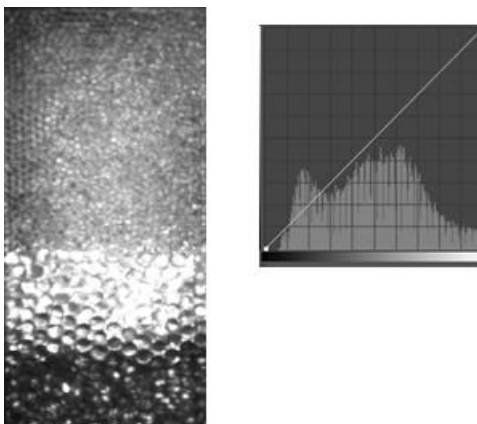


Рис 2.6. Исходный снимок.

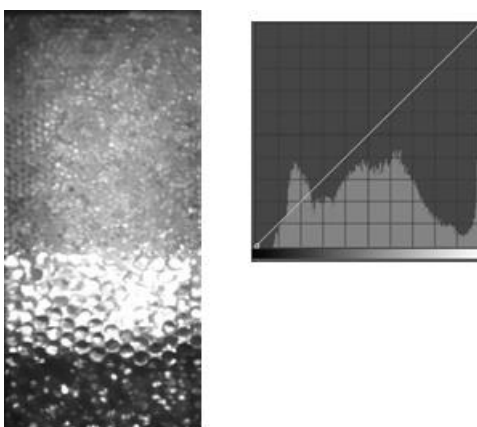


Рис 2.7. Снимок с фильтром.

Изначально кривая ровней, соответствующая гистограмме, представляет собой прямую, соединяющую левый нижний и правый верхний углы гистограммы (рис.2.6, 2.7). Затем, она вручную изменяется так, чтобы она проходила через локальный минимум гистограммы, расположенный между двумя пиками, упомянутыми ранее. Таким образом, все, что было расположено слева от локального минимума становится черным, а то, что справа – белым (рис 2.8).

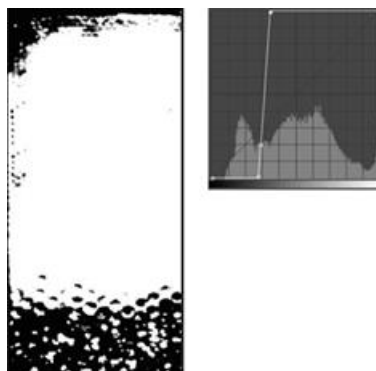


Рис 2.8. Обработанный снимок

Существует некоторая погрешность, поэтому на изображении могут оставаться пиксели темно-серых или почти белых оттенков, но их наличие не существенно. Такой способ обработки фотографий значительно упрощает исследование движения фронта жидкости (рис.2.9)

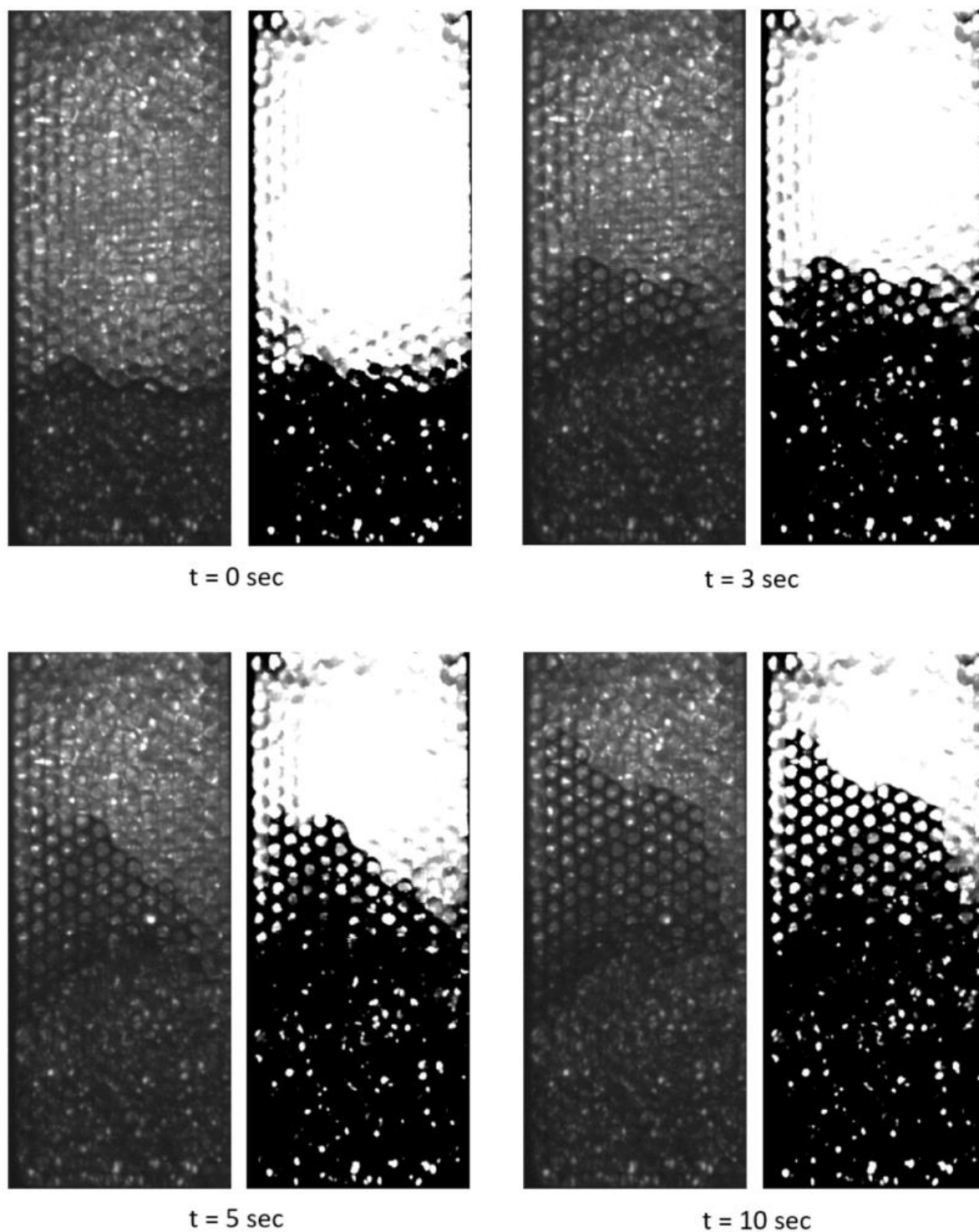


Рис. 2.9. Изображения до и после обработки.

Хотелось бы обратить внимание на интересный эффект хорошо заметный на рис.2.9. Несмотря на то, что течение происходит в однородной среде можно отметить развитие неустойчивости фронта течения. В данном случае вязкая жидкость (подкрашенная вода) вытесняет существенно менее вязкий газ. Поэтому этот эффект не связан с неустойчивость Саффмана-Тейлора

рассматриваемой в Главе 1, напротив отношение вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей меньше единицы должно приводить к стабилизации фронта. Здесь обнаруживает себя другой вид неустойчивости, который можно назвать «капиллярная неустойчивость». Капиллярная неустойчивость вызвана неоднородностью капиллярных характеристик насыщаемой среды. В данном случае неоднородность среды может быть вызвана неравномерной шероховатостью шариков, потожировыми следами, оставленными на шариках экспериментатором в процессе их укладки и пр.

2.1.3. Результаты обработки изображений.

Была проведена обработка изображений для 7 экспериментов. Экспериментальные параметры представлены в таблице 2.1. Для всех экспериментов общими были следующие параметры:

вытесняющая жидкость: вязкость (μ_w) = $1 \cdot 10^{-3}$ Па · сек, плотность (ρ_w) = 10^3 кг/м³; вытесняемый газ: вязкость (μ_g) = $1.5 \cdot 10^{-5}$ Па · сек, плотность (ρ_g) = 1.4 кг/м³; поверхностное натяжение (σ) = 0.0582 Н/м.

Эксперимент 1	Случай однородной среды. проницаемость (K_A) = $2 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.466, диаметр шариков составляющих среду 2 мм.
Эксперимент 2	Случай однородной среды. проницаемость (K_A) = $8.5 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.458, диаметр шариков составляющих среду 6 мм.
Эксперимент 3	Случай неоднородной среды, два слоя. Нижний слой: проницаемость (K_A) = $8.5 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.458, диаметр шариков составляющих среду 6 мм, высота нижнего слоя 65 мм; верхний слой: проницаемость (K_A) = $2 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.466, диаметр шариков составляющих среду 2 мм;

Эксперимент 4	Случай неоднородной среды, два слоя. Нижний слой: проницаемость (K_A) = $2 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.466, диаметр шариков составляющих среду 2 мм, высота нижнего слоя 65 мм; верхний слой: проницаемость (K_A) = $8.5 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.458, диаметр шариков составляющих среду 6 мм;
Эксперимент 5	Случай со вставкой. Основная пористая среда: проницаемость (K_A) = $2 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.466, диаметр шариков составляющих среду 2 мм; вставка: проницаемость (K_A) = $8.5 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.458, диаметр шариков составляющих среду 6 мм;
Эксперимент 6	Случай со вставкой. Основная пористая среда: проницаемость (K_A) = $8.5 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.458, диаметр шариков составляющих среду 6 мм; вставка: проницаемость (K_A) = $2 \cdot 10^{-9}$ м ² , пористость (φ) = 0.466, диаметр шариков составляющих среду 2 мм;

Таблица 2.1. Параметры экспериментов.

Результаты обработки изображений, полученных для экспериментов 1-4 представлены на рис.2.10. – рис.2.13.

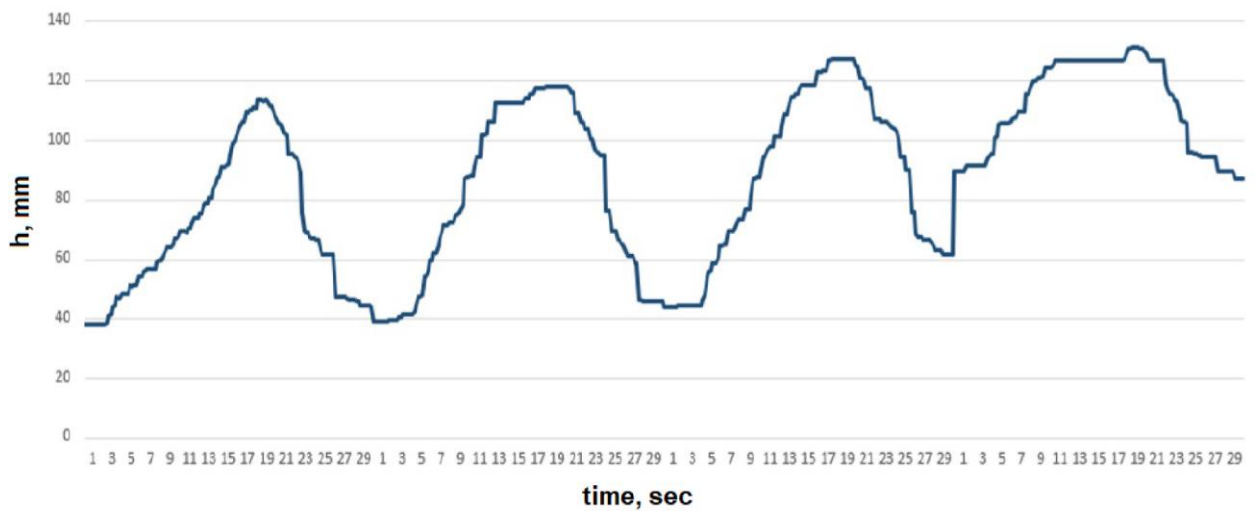


Рис.2.10. Результат обработки данных эксперимента №1. Зависимость положения фронта пропитки в зависимости от времени.

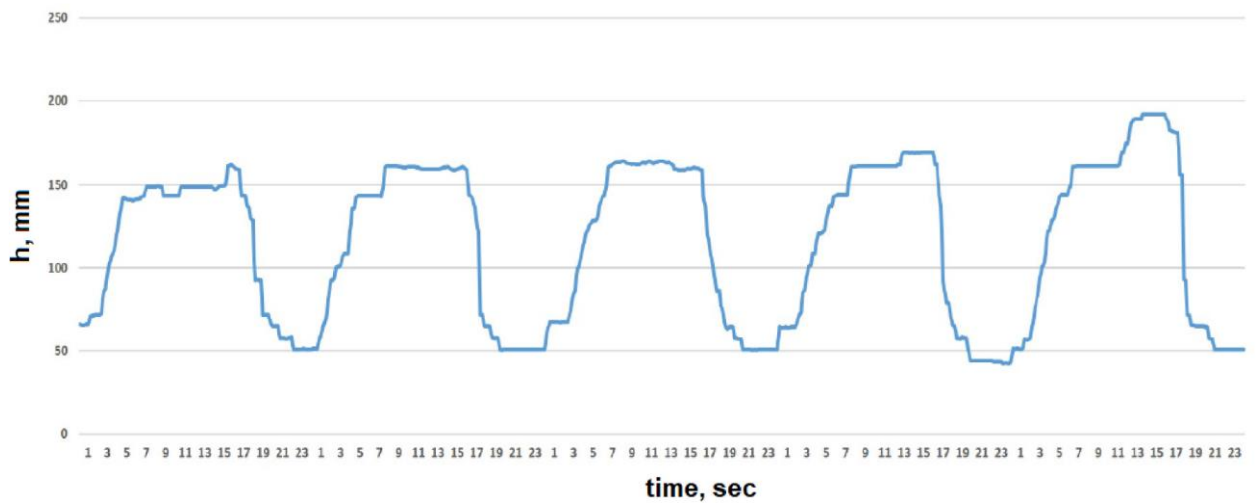


Рис.2.11. Результат обработки данных эксперимента №2. Зависимость положения фронта пропитки в зависимости от времени.

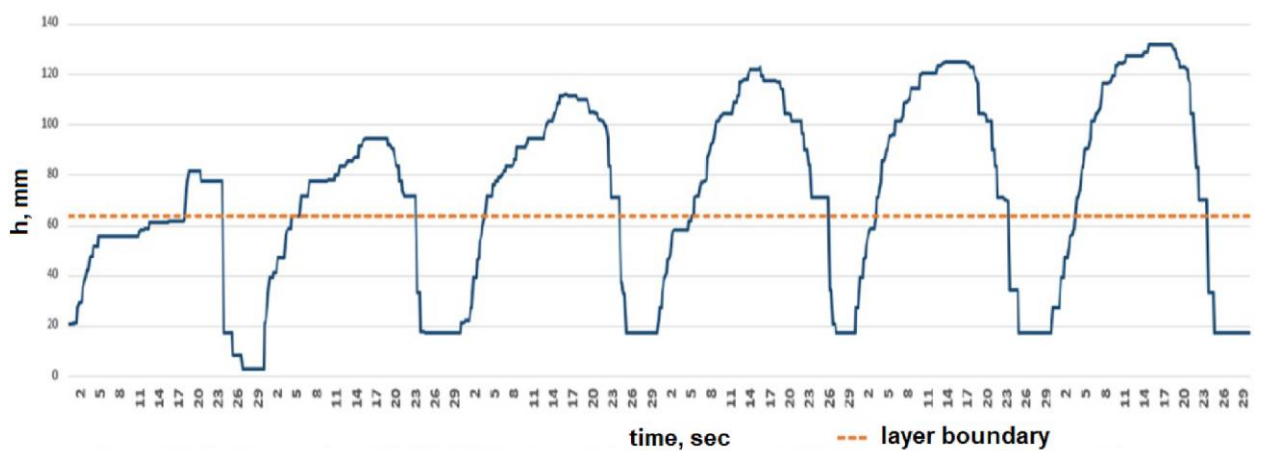


Рис.2.12. Результат обработки данных эксперимента №3. Зависимость положения фронта пропитки в зависимости от времени. Оранжевым

пунктиром обозначена граница раздела сред с различными проницаемостями.

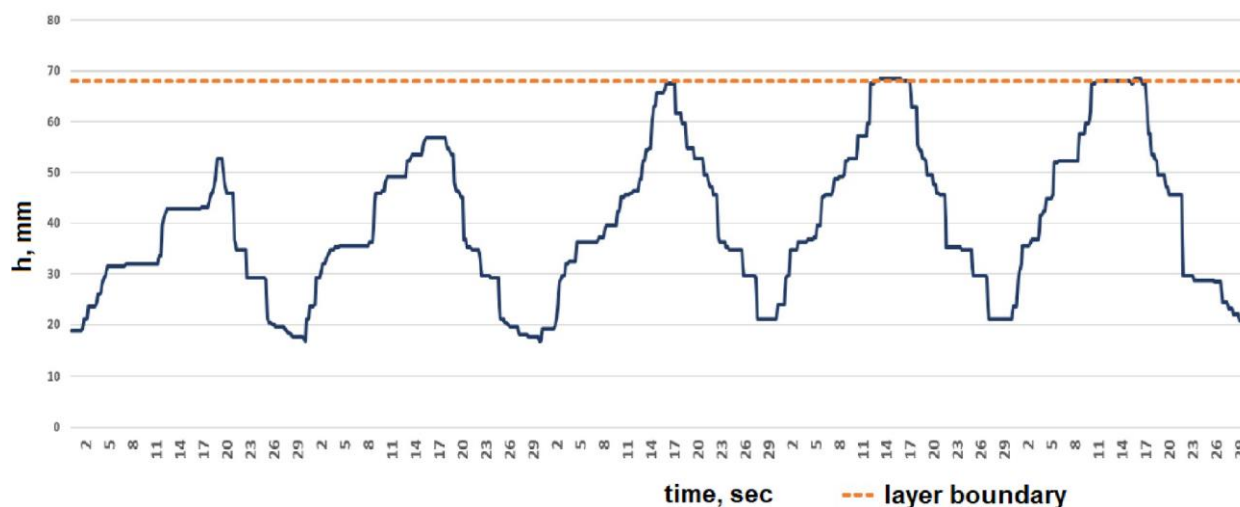


Рис.2.13. *Результат обработки данных эксперимента №4. Зависимость положения фронта пропитки в зависимости от времени. Оранжевым пунктиром обозначена граница раздела сред с различными проницаемостями.*

Стоит отметить, что для всех экспериментов (№1-№4) просматривается тенденция подъема жидкости на большую высоту с каждой последующей параболой. Это связано с тем, что жидкость течёт интенсивнее в уже смоченной среде. Таким образом, капиллярные характеристики среды существенно зависят от смоченности среды, это стоит учитывать при математическом моделировании многократной пропитке пористой среды. Эффект гистерезиса, т.е. учёт изменения капиллярных характеристик во время предыдущих пропиток («память» среды) учтён в математической модели описанной в части 2.2 данной главы. Эффект подъема жидкости на большую высоту с каждой параболой менее всего заметен в эксперименте №2. Это можно объяснить тем, что в эксперименте №2 среда состояла из крупных шариков, как следствие капиллярные эффекты в ней менее выражены.

В эксперименте № 3 при переходе из зоны с высокой проницаемостью в зону с низкой проницаемостью наблюдается увеличение скорости межфазной границы. Ускорение фронта впитывания при прохождении границы сред с

различными проницаемостями объясняется следующим: эффекты увеличения капиллярных сил и сил сопротивления действуют на разных временных масштабах в нестационарных потоках: капиллярные силы увеличиваются скачком, а затем поддерживают постоянное значение, в то время как силы сопротивления линейно растут при увеличении глубины проникновения жидкости. В эксперименте № 4 напротив, при достижении границы сред с различными проницаемостями жидкость «останавливается», дальнейшее продвижение фронта пропитки не происходит. Это вызвано тем, что верхний слой состоит из крупных шариков. В них капиллярные силы меньше и их недостаточно, что превысит силу сопротивления всего «столба» жидкости.

Для случая обработки эксперимента 5 и эксперимента 6 течение жидкости рассматривается в трех вертикальных сечениях (рис.2.14 и 2.15): вне области вставки, на границе областей (однородной и со вставкой) и в области неоднородности проницаемости, сформированной вставкой шариков другого диаметра. Результаты обработки изображений представлены на рис.2.16 и 2.17.

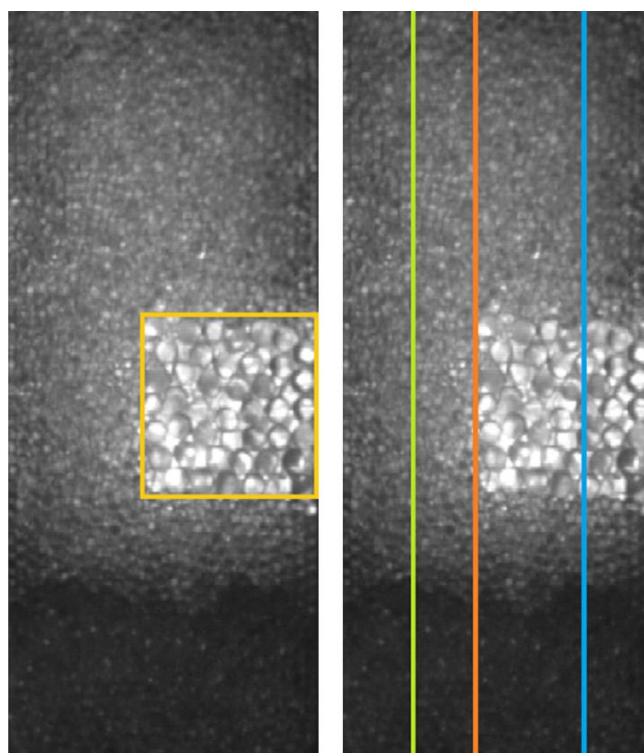


Рис.2.14. Три сечения, в которых обрабатывались данные эксперимента № 5.

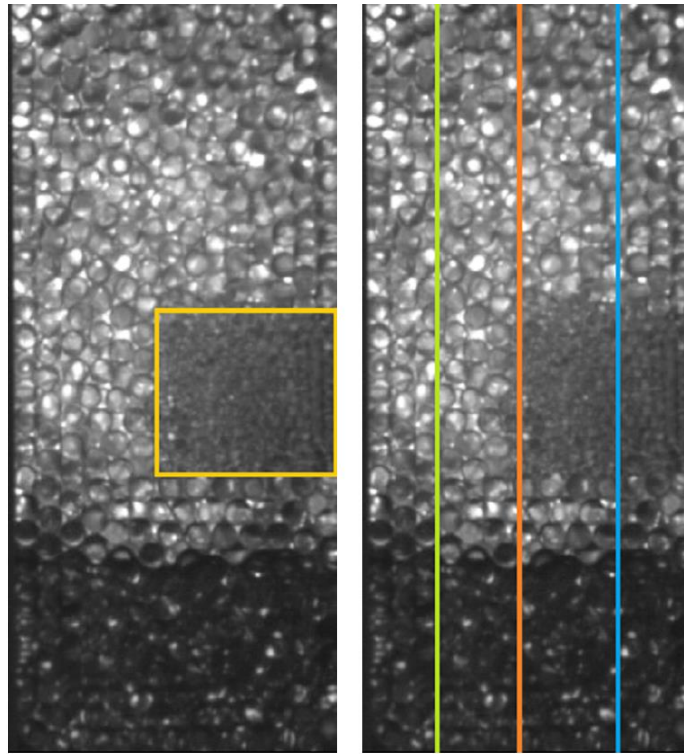


Рис.2.15. Три сечения, в которых обрабатывались данные эксперимента № 6.

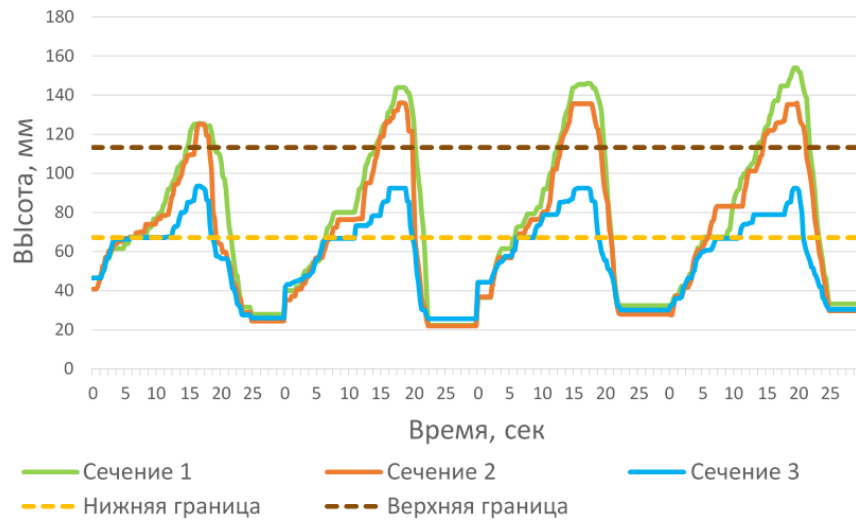


Рис.2.16. Результат обработки данных эксперимента №5. Зависимость положения фронта пропитки в зависимости от времени для трёх сечений. Оранжевым и коричневым пунктиром обозначены границы раздела сред с различными проницаемостями.

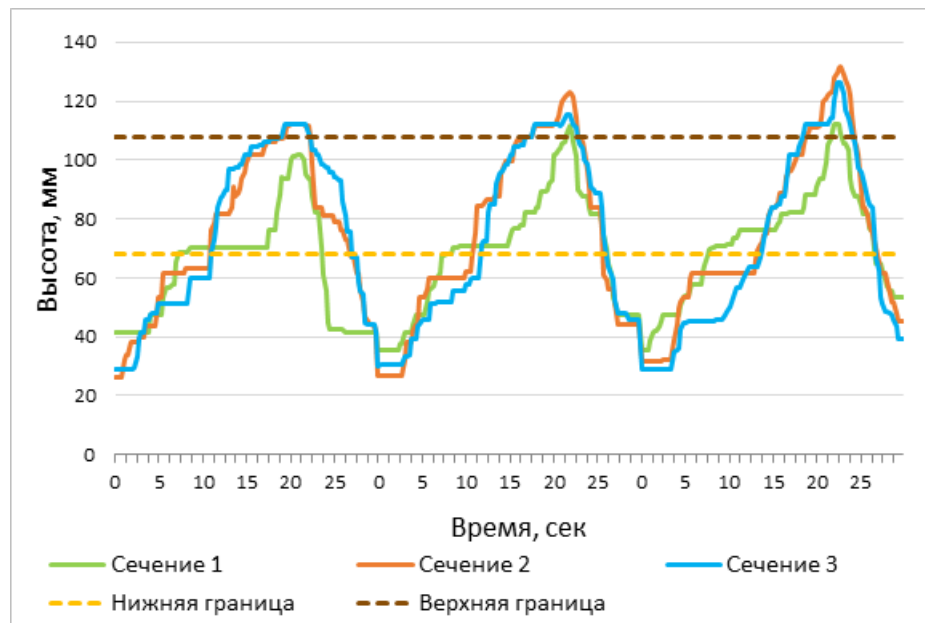


Рис.2.17. Результат обработки данных эксперимента №6. Зависимость положения фронта пропитки в зависимости от времени для трёх сечений. Оранжевым и коричневым пунктиром обозначены границы раздела сред с различными проницаемостями.

Для эксперимента № 5 (рис.2.16) в сечении 1, проходящем через однородную область (зеленая кривая), с каждой последующей параболой жидкость поднимается на большую высоту. На участке 3, проходящем через область неоднородности (синяя кривая), этот эффект не заметен; кроме того, при переходе из области с мелкими шариками в область с большими шариками жидкость замедляется. Это связано с тем, что капиллярная сила в крупных порах меньше, это приводит к замедлению движения жидкости несмотря на то, что сила сопротивления в крупных шарах меньше. На границе однородной и неоднородной зон (участок 2, оранжевая кривая) имеет место эффект подъема жидкости по каждой параболе на большую высоту, но он менее выражен.

Для эксперимента № 6 (рис.2.17) в сечении 1, проходящем через однородную область (зеленая кривая), эффект подъема на большую высоту при повторном впитывании менее заметен, чем в опыте № 5. Это связано с тем, что в опыте № 6 однородная среда состоит из крупных шаров, в которых капиллярные эффекты менее выражены, поэтому для сечения 2 (оранжевая кривая) более

заметен эффект подъема на большую высоту: область с пониженной проницаемостью, состоящая из мелких шариков, начинает оказывать влияние. В сечении 3, проходящем через область неоднородности (синяя кривая), при переходе от больших шаров к малым происходит ускорение фронта. Это связано с тем, что при пересечении границы с разной проницаемостью капиллярная сила изменяется скачком, а сила сопротивления (которая у маленьких шаров имеет большее значение, чем у больших) постепенно увеличивается с увеличением уровня проникновения жидкости.

2.2. Математическое и численное моделирование процесса многократной пропитки пористой среды в условиях микрогравитации.

2.2.1. Уравнения баланса массы фаз.

$$\varphi \frac{\partial \rho_k s_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_k s_k \varphi u_{kj}) = 0 \quad (2.1)$$

Пористость среды полагается независимой от времени. Плотности жидкостей постоянны, поэтому на них можно разделить. Скорость фильтрации фазы выражается через истинную скорость фильтрации. Уравнение принимает вид:

$$\varphi \frac{\partial s_k}{\partial t} + \frac{\partial v_{kj}}{\partial x_j} = 0, v_{kj} = \varphi s_k u_{kj} \quad (2.2)$$

Определяется средняя по объему скорость фильтрации. Суммирование уравнений (2.2) по фазам позволяет получить уравнение неразрывности для средней по объему скорости фильтрации:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0, v_j = v_{1j} + v_{2j} \quad (2.3)$$

2.2.2. Уравнения импульса.

В общем случае уравнения импульса имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_k \varphi S_k u_{ki}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_k \varphi S_k u_{ki} u_{kj}) + \varphi S_k \frac{\partial p_k}{\partial x_i} = -\frac{\mu_k}{K} \varphi S_k u_{ki} - F_{ksi} \quad (2.4)$$

В правой части уравнения (2.4) первый член отвечает за взаимодействие фазы со скелетом, а второй характеризует взаимодействие фаз друг с другом. Второе слагаемое отбрасывается и взаимодействие фаз моделируется путем введения относительной проницаемости. Затем уравнение обезразмеривается с учетом характерных величин.

$$\begin{aligned} \rho_k &= \rho_w \widehat{\rho}_k \\ x_j &= L \widehat{x}_j \\ v_{k,j} &= \frac{K_{ch} p_c}{\mu_w L} \widehat{v}_{k,j} \\ K &= K_{ch} \widehat{K} \\ \mu_k &= \mu_w \widehat{\mu}_k \\ p_k &= p_c \widehat{p}_k \\ t &= \frac{\mu_w L^2}{K_{ch} p_c} \widehat{t} \end{aligned}$$

Здесь “ $\widehat{}$ ” означает безразмерную величину. После процедуры обезразмеривания оказывается, что коэффициенты первых двух членов уравнения одинаковы:

$$\frac{K_{ch}^2 p_c^c \rho_w}{\mu^2 L^2} \frac{\partial (\widehat{\rho}_k \varphi S_k \widehat{u}_{kl})}{\partial \widehat{t}} + \frac{K_{ch}^2 p_c^c \rho_w}{\mu^2 L^2} \frac{\partial (\widehat{\rho}_k \varphi S_k \widehat{u}_{kl} \widehat{u}_{kj})}{\partial \widehat{x}_j} + \varphi S_k \frac{\partial \widehat{p}_k}{\partial \widehat{x}_i} = -\frac{\widehat{\mu}_k}{\widehat{K}} \widehat{u}_{kl} \quad (2.5)$$

В условиях данного исследования порядок коэффициента равен 10^{-5} , тогда как порядок других коэффициентов – 1.

$$\frac{K_{ch}^2 p_c^c \rho_w}{\mu^2 L^2} \approx 1,17 \cdot 10^{-5}$$

Поэтому инерциальными членами уравнения можно пренебречь и уравнение сводится к классическому закону Дарси:

$$\varphi S_k \frac{\partial \widehat{p}_k}{\partial \widehat{x}_i} = -\frac{\widehat{\mu}_k}{\widehat{K}} \widehat{u}_{k,i} \quad (2.6)$$

Взаимодействие фаз моделируется посредством относительных проницаемостей, а влияние гравитации учитывается. Значение гравитации изменяется согласно данным с акселерометра самолета. Поэтому закон Дарси переписывается следующим образом:

$$v_{kj} = -K_A \frac{K_k^R(s_1, s_2)}{\mu_k} \left(\frac{\partial p_k}{\partial x_j} + \rho_k g_j \right) \quad (2.7)$$

Фаз всего две, поэтому между насыщенностями простое соотношение: $s_1 + s_2 = 1$. Далее индекс насыщенности $s_1 = s$ опускается, а насыщенность $s_2 = 1 - s$ выражается через нее. Это позволяет свести зависимости от всех фаз к зависимости от одной первой фазы.

Капиллярное давление определяется разницей давлений между фазами:

$$p_1 = p_2 - p_c(s) \quad (2.8)$$

Предполагается, что капиллярное давление зависит только от насыщенности (и других параметров, но не от скорости фильтрации, например). Знак выбран таким образом, что капиллярное давление больше нуля, когда смачивающей является первая фаза.

2.2.3. Моделирование относительных проницаемостей.

Относительные проницаемости моделируются согласно модели Кори:

$$K_1^R = a_1 S^{n_1}, K_2^R = a_2 (1 - S)^{n_2}, S = \frac{s - s_1^R}{1 - (s_1^R + s_2^R)} \quad (2.9)$$

Без гистерезиса дренажа и пропитки все параметры в этом выражении постоянны, с гистерезисом переменными являются остаточные насыщенности и значения a_k .

Гистерезис моделируется следующим образом. Пусть изначально образец сухой, заполнен несмачивающей второй фазой. Тогда начальное состояние $s_1^R = 0$, при этом

$$s_2^R = \frac{1}{1 + c_2} = const,$$

а $a_1 = k_1^R$; $a_2 = 1$. Эти постоянные сохраняются до тех пор, пока наблюдается пропитка, то есть пока выполняется условие $\frac{\partial s}{\partial t} \geq 0$.

Пусть в некоторый момент знак производной насыщенности меняется на противоположный: $\frac{\partial s}{\partial t} < 0$. Значение s_1^R , которое сохраняется за все время дренажа, равняется

$$s_1^R = \frac{s_1^{\max}}{1 + C_1 s_1^{\max}} \quad (2.10)$$

Здесь s_1^{\max} - максимальное значение насыщенности первой фазы, достигнутое во время пропитки. Постоянные C_1, C_2 задаются изначально, они называются постоянными Лэнда, а эта модель гистерезиса -- моделью Лэнда. Также изменяются постоянные a_1 и a_2 : $a_1 = 1; a_2 = k_2^R$. Эта смена отражает характер относительных проницаемостей при дренаже и пропитке.

Если знак производной насыщенности опять меняется и снова начинается пропитка, величина s_1^R остается прежней, изменяются только a_1 и a_2 . Когда пропитка сменяется дренажом, новое значение s_1^R определяется по формуле (2.10) и остается таковым и во время дренажа, и т.д. Можно отметить, что величина s_2^R в подобном процессе не меняется, потому что изначально была максимальной. Если бы вместо первоначальной пропитки был дренаж, такие же изменения происходили бы с величиной s_2^R , и s_1^R изначально была бы максимальной.

3.2.4. Моделирование капиллярного давления

Капиллярное давление моделируется по модели J-функции Леверетта, причем сама J-функция моделируется не одной, а обеими ветвями, что при гистерезисе оказывается важным.:

$$p_c = \frac{\sigma \cos \theta}{\sqrt{K_A / \phi}} J(S), \quad J(S) = C_0 + C_W S^{-a_W} - C_N (1 - S)^{-a_N},$$

$$S = \frac{s - s_1^R}{1 - (s_1^R + s_2^R)} \quad (2.11)$$

Моделирование гистерезиса уже заложено в подобную формулу капиллярного давления, поскольку в ней присутствуют неявно остаточные насыщенности s_k^R . Стоит отметить, что при первичной пропитке ветвь дренажа (первый член) обнуляется (аналогично, при первичном дренаже обнуляется ветвь пропитки). Как только первичное состояние отменяется (например, пропитка сменяется дренажом), включается вторая ветвь. Одновременно

работает гистерезис, новое значение предельных насыщенных определяется законом Лэнда.

2.2.5 Начальные и граничные условия

Задача одномерная, все переменные заданы на отрезке $x \in [0, L]$. В начальный момент времени столб пористой среды пропитан до высоты x_{ini} выше среда сухая:

$$s = \begin{cases} 0, & x \geq x_{ini}, \\ 1, & x < x_{ini}. \end{cases}$$

На основании этих значений по модели Лэнда вычисляются остаточные насыщенности. Граничные условия таковы: на верхней границе $x = L$ давление равно атмосферному, т.е. $p = p_0$ на нижней границе $x = 0$ к нему добавляется гидростатическое давление обеих фаз $p = p_\infty = p_0 + \rho_1 x_{гр} g + \rho_2 (L - x_{гр}) g$.

В эксперименте уровень гравитации был переменным, поэтому при расчёте использовались данные записи акселерометра, полученные в процессе параболического полёта (рис.2.18.)

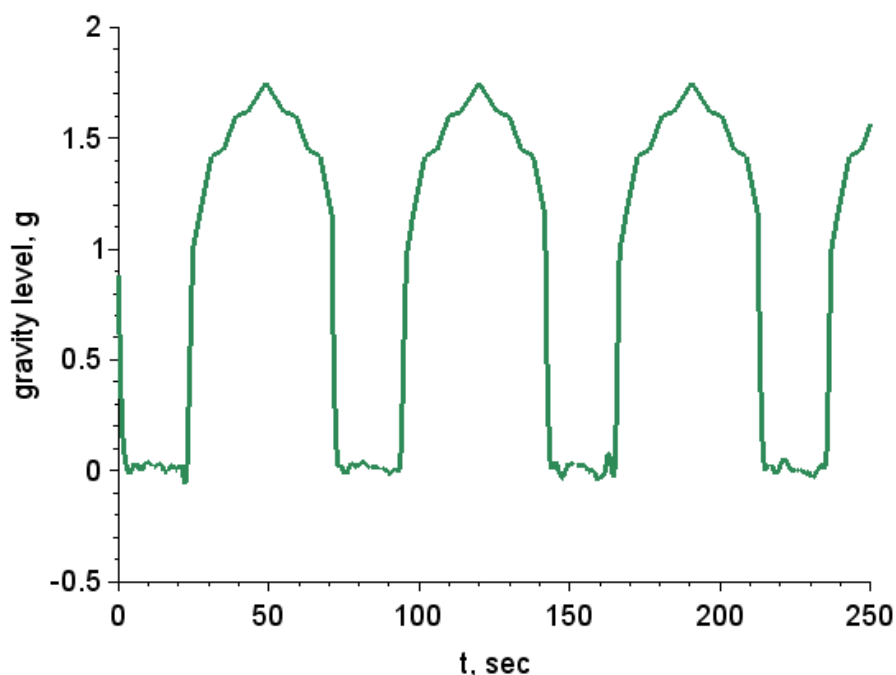


Рис.2.18. Уровень гравитации в процессе параболического полёта

2.3. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными для исследования пропитки во время параболических полётов.

На рис. 2.19. – рис. 2.25 приведены результаты сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Для образца пористой среды со вставкой численное моделирование проводилось только для первого и третьего сечений, так как случай второго сечения требует другого подхода, например, перехода к двумерной задаче. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментом.

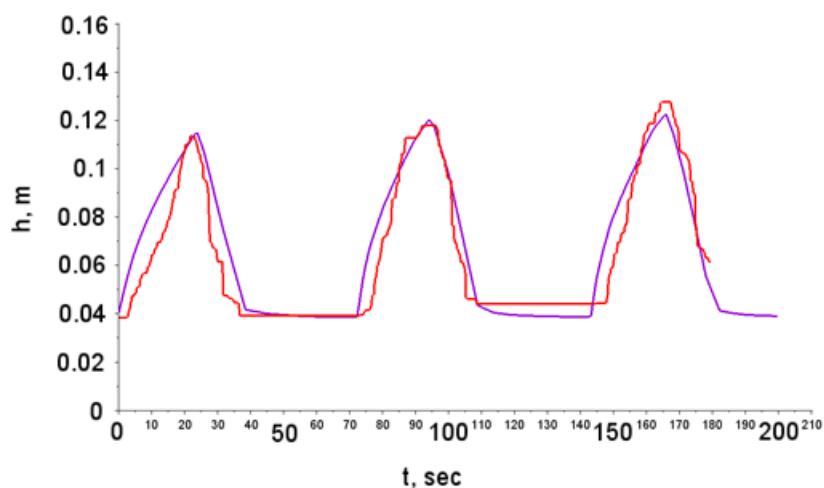


Рис.2.19. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Эксперимент № 1. Красная кривая – экспериментальные данные, фиолетовая кривая – результат численного моделирования.

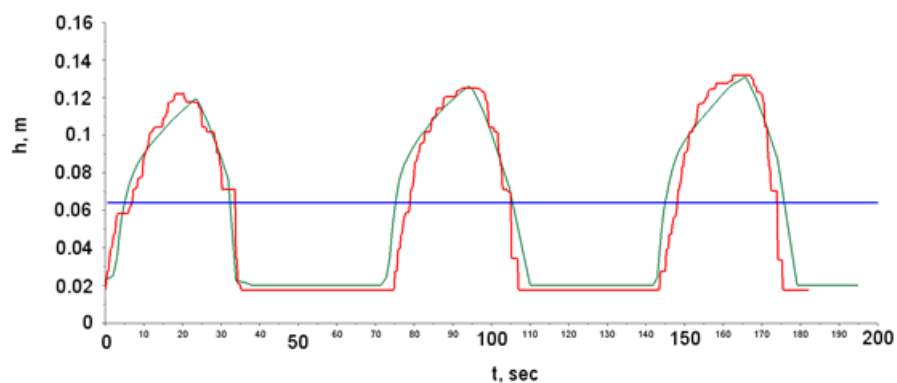


Рис.2.20. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Эксперимент № 3. Красная кривая – экспериментальные данные, зелёная кривая – результат численного моделирования, синяя линия – граница раздела областей с различной проницаемостью

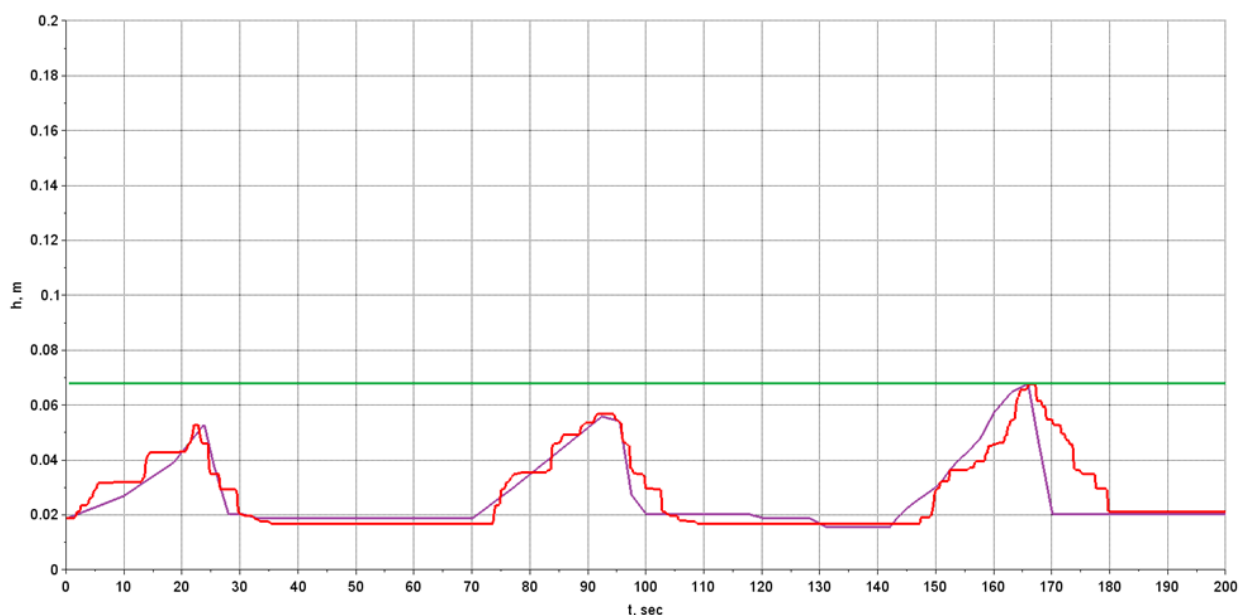


Рис.2.21. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Эксперимент № 4. Красная кривая – экспериментальные данные, фиолетовая кривая – результат численного моделирования, зелёная линия – граница раздела областей с различной проницаемостью.

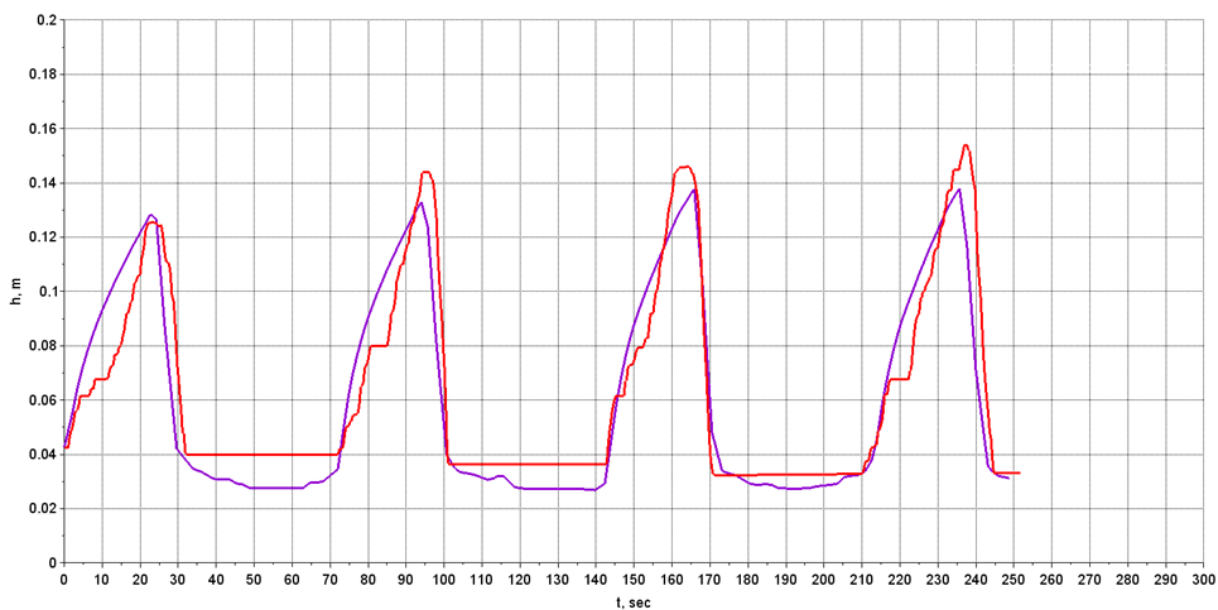


Рис.2.22. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Эксперимент № 5, сечение 1. Красная кривая – экспериментальные данные, фиолетовая кривая – результат численного моделирования.

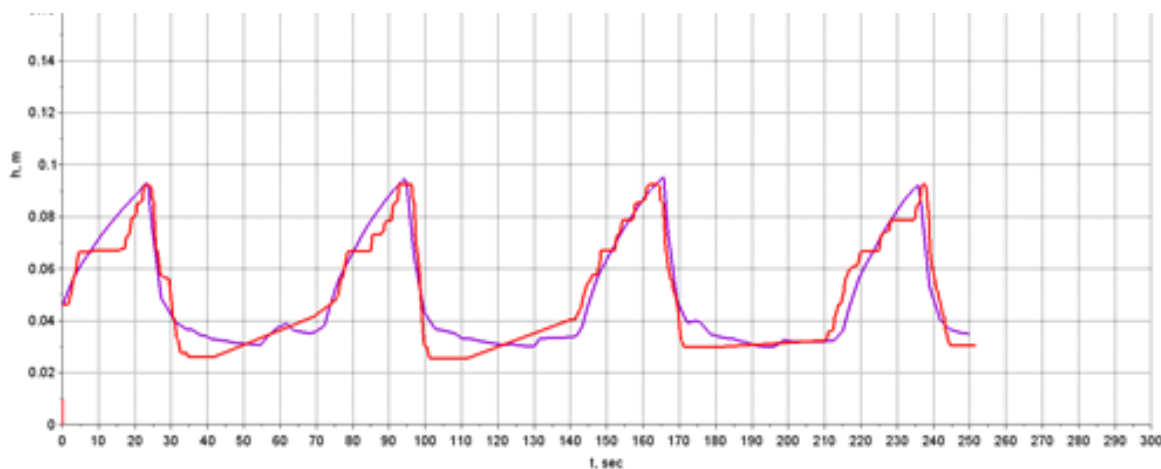


Рис.2.23. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Эксперимент № 5, сечение 3. Красная кривая – экспериментальные данные, фиолетовая кривая – результат численного моделирования.

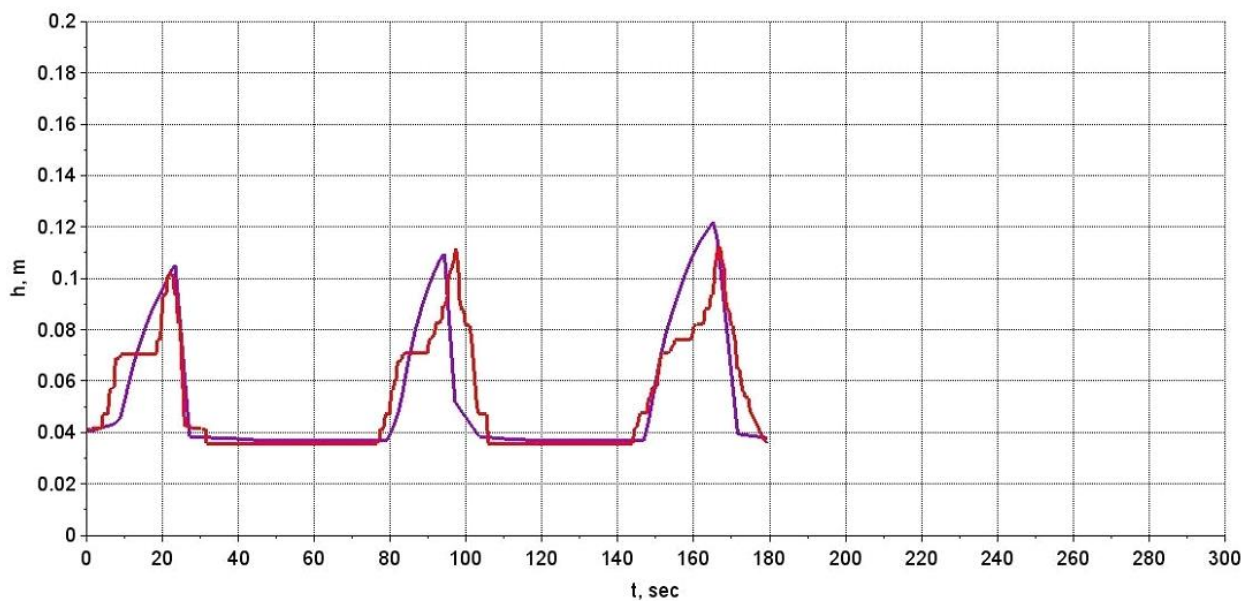


Рис.2.24. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Эксперимент № 6, сечение 1. Красная кривая – экспериментальные данные, фиолетовая кривая – результат численного моделирования.

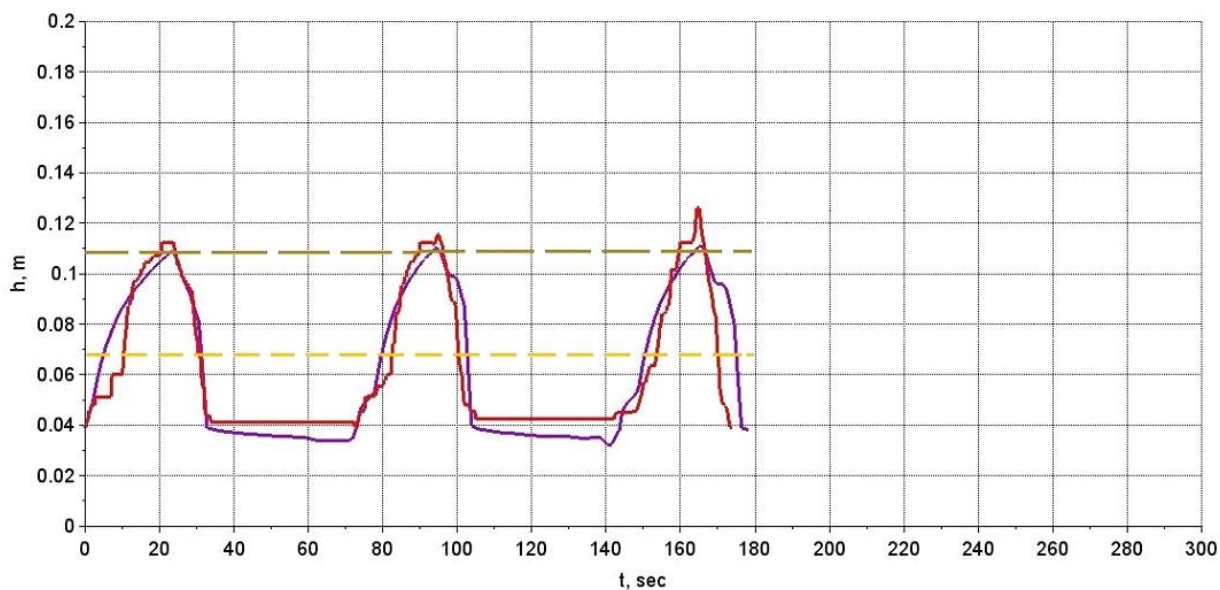


Рис.2.25. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Эксперимент № 6, сечение 3. Красная кривая – экспериментальные данные, фиолетовая кривая – результат численного моделирования. Жёлтым и коричневым пунктиром обозначены границы областей с различными проницаемостями.

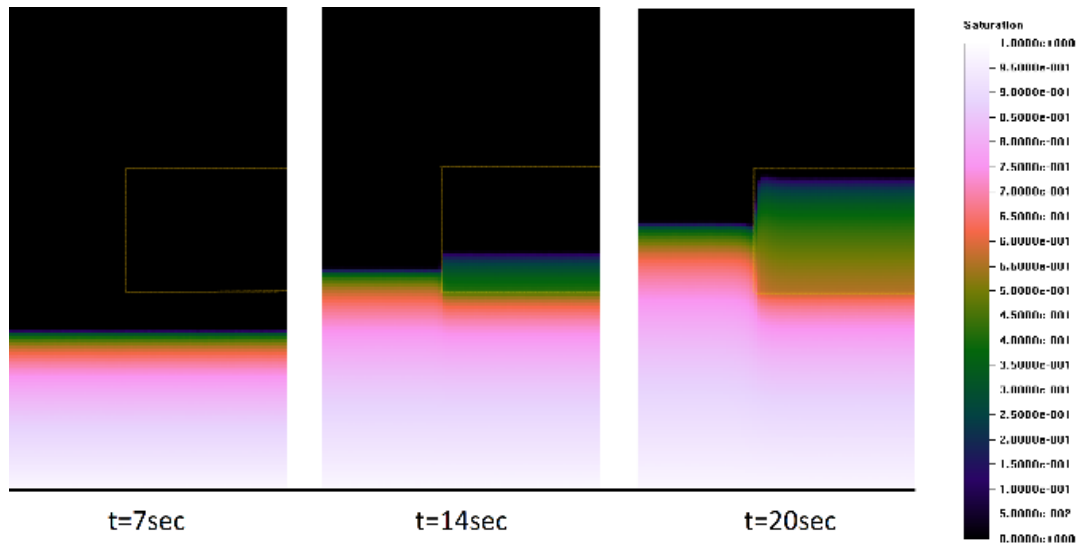


Рис.2.26. Результат двумерного моделирования пропитки неоднородной среды.

На рис.2.26 Представлен результат двухмерного численного моделирования процесса пропитки пористой среды со вставкой низкой проницаемости(параметры расчёта соответствуют эксперименту №6). Как и ожидалось, в среде с пониженной проницаемостью наблюдается ускорение фронта пропитки. Также в области с пониженной проницаемостью усиливается размытие фронта, таким образом понижение проницаемости приводит к увеличению дисперсии при капиллярной пропитке пористой среды.

2.4. Влияние инерционных членов в уравнении импульса при одномерном моделировании капиллярной пропитки.

Уравнения импульса, из которых выводятся законы Дарси для каждой фазы, выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \varphi s_k v_{k,j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_k \varphi s_k v_{k,i} v_{k,j}) + \varphi s_k \frac{\partial p_k}{\partial x_j} = -\frac{\mu_k}{K_0} v_{k,i} + F_k$$

μ_k - динамическая вязкость, K_0 - абсолютная проницаемость, p_k - давление в фазе, F_k - силы взаимодействия с другими фазами флюида. Правая часть данного уравнения соответствует сумме силы взаимодействия со скелетом, и сил взаимодействия с другими фазами флюида.

Для получения уравнений Дарси в уравнении импульса пренебрегают инерциальными членами, а силы взаимодействия с другими фазами, кроме скелета, моделируют модификацией основной силы взаимодействия со скелетом с помощью введения относительной проницаемости [171]. Мы не будем пренебрегать инерционными членами, при этом конвективная составляющая инерции в одномерном случае обнулится в силу уравнения неразрывности, в предположении, что зона размытия фронта пренебрежимо мала. Останется лишь нестационарная составляющая инерции. После этого закон Дарси будет модифицированным, содержащим производную скорости по времени:

$$u_{k,i} = - \frac{K_0 K_k^R}{\mu_k} \left(\frac{\partial p_k}{\partial x_j} + \frac{\rho_k}{\varphi s_k} \frac{\partial u_{k,i}}{\partial t} \right)$$

Здесь $K_k^R = k_k^R \cdot s_k$ - относительная проницаемость фазы, зависящая от ее насыщенности s_k и, в общем случае, от насыщенностей других фаз (если таковых больше 2). Следует заметить, что поскольку относительная проницаемость равна нулю в случае нулевой насыщенности фазы s_k , то сингулярность в этом случае в модифицированном законе Дарси места не имеет. Переносим производную от неизвестной в левую часть, запишем модифицированный закон Дарси в следующем виде:

$$u_{k,i} + \frac{K_0 \rho_k}{\varphi \mu_k} \cdot k_k^R \frac{\partial u_{k,i}}{\partial t} = - \frac{K_0 K_k^R}{\mu_k} \frac{\partial p_k}{\partial x_i}$$

Обозначим параметр, стоящий перед производной скорости по времени и имеющий размерность времени, как T_k ; в общем случае он зависит от положения в пространстве, как и абсолютная проницаемость, но не от текущего распределения переменных параметров (насыщенности, скорости и проч.):

$$T_k = \frac{K_0 \rho_k}{\varphi \mu_k}$$

Уравнение Дарси запишется тогда в следующем виде:

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

Параметр T_k можно назвать характерным временем инерции. В том случае, когда проницаемость K_0 достаточно мала, как в обычных пористых средах, это время ничтожно и инерцией можно пренебречь. Но если пористая среда - это насыпанные камни/шарики с достаточно большим диаметром, то такое время для маловязких жидкостей может составить несколько секунд и выше; пренебрегать инерцией скорее всего будет уже нельзя. Можно ввести безразмерный параметр $\Psi = T_k/t_{cap}$ характеризующий отношение характерного времени инерции к характерному времени капиллярной пропитки. Учет инерционных эффектов существенен, когда значение этого параметра превосходит единицу: $\Psi = \frac{K_0 \rho_k}{\varphi \mu_k t_{cap}} \geq 1$.

Чтобы продемонстрировать роль инерционных эффектов в этой задаче, были проведены два модельных расчета для высокопроницаемой пористой среды: с учетом инерции и без инерции (рис. 2.27). Можно увидеть, что динамика впитывания на левом и правом графиках существенно различается. В случае, когда учитываются инерционные эффекты (слева), график сначала имеет форму квадратичной функции (0 сек-0,02 сек), затем линейной (0,02 сек-0,06 сек), и затем как квадратный корень (0,06 с - 2 с). Затем при приближении фронта к границе зон с различной проницаемостью эти участки повторяются: квадратичный (2 с - 3 с), линейный (3 с - 3,9 с), квадратный корень. Этот результат согласуется с результатами, представленными в [77]. В случае, если инерционные эффекты не учитываются (справа), график имеет вид монотонно возрастающей функции с небольшим переломом при прохождении через границу зон с различной проницаемостью (4 см).

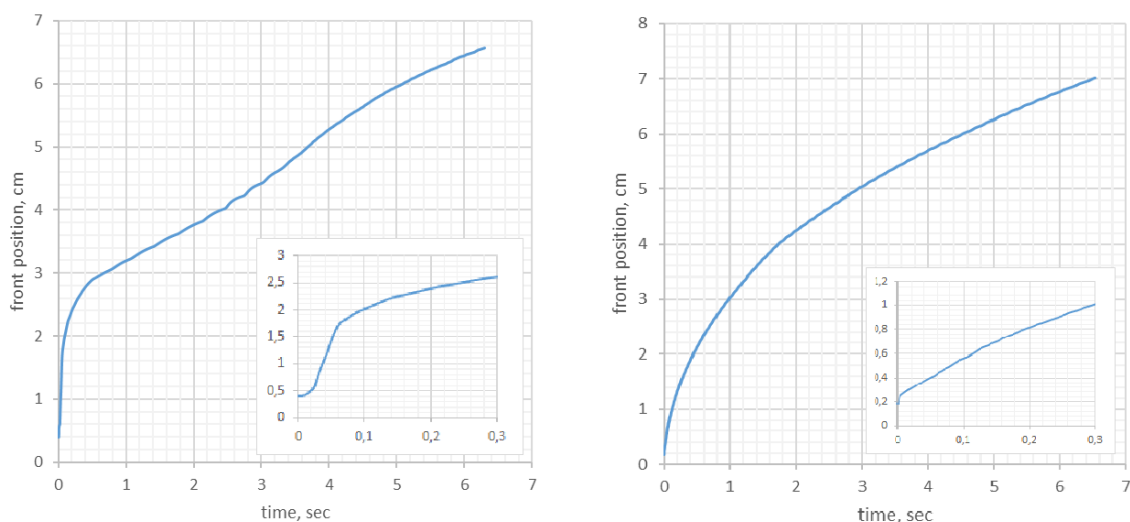


Рис.2.27. Результат расчёта с учётом инерционных эффектов(слева) и без учёта инерционных эффектов(справа).

2.5. Описание экспериментов по пропитке натуральной пористой среды на околоземной орбите.

Эксперименты по капиллярной пропитке жидкостью естественной пористой среды проводились в рамках программы MIRROR GAS. Эксперименты были подготовлены и контролировались доктором Д'Арси Хартом, (Мемориальный университет Ньюфаундленда), докторами Лорье Шраммом и Фредом Вассмутом, (PRI, Калгари). Полезная нагрузка MIRROR показана на рис.2.28. Подробное описание экспериментальных процедур и методик можно найти в [112]. Фильтрация наблюдалась в трех цилиндрических образцах (рис.2.29) с одинаковой пористой средой: смесь 20% (по весу) каолинита (глинистый минерал) и 80% кварцевого песка. Жидкости, движущиеся в каждой из трех ячеек, были: сырая нефть, смазочное масло и раствор полимера в дистиллированной воде.



Рис.2.28. Полезная нагрузка MIRROR.

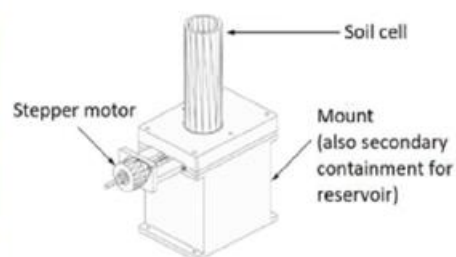


Рис.2.29. Экспериментальная ячейка для экспериментов на околоземной орбите.

Пористая среда и жидкости были по-отдельности доставлены на орбиту. Экспериментальная ячейка состояла из резервуара для жидкости и цилиндрической ёмкости для пористой среды с раздвижной перегородкой, разделяющей их (рис.2.29). В начале эксперимента шаговый двигатель убирал перегородку, после чего жидкость начинала затекать в пористую среду под действием капиллярных сил. Уровень жидкости в почве регистрировался с помощью 48 волоконно-оптических датчиков, расположенных вдоль длины образца. Результаты эксперимента показаны на рисунке 2.30. По вертикали показана высота, на которой находится датчик, по горизонтали – время, когда датчик сработал.

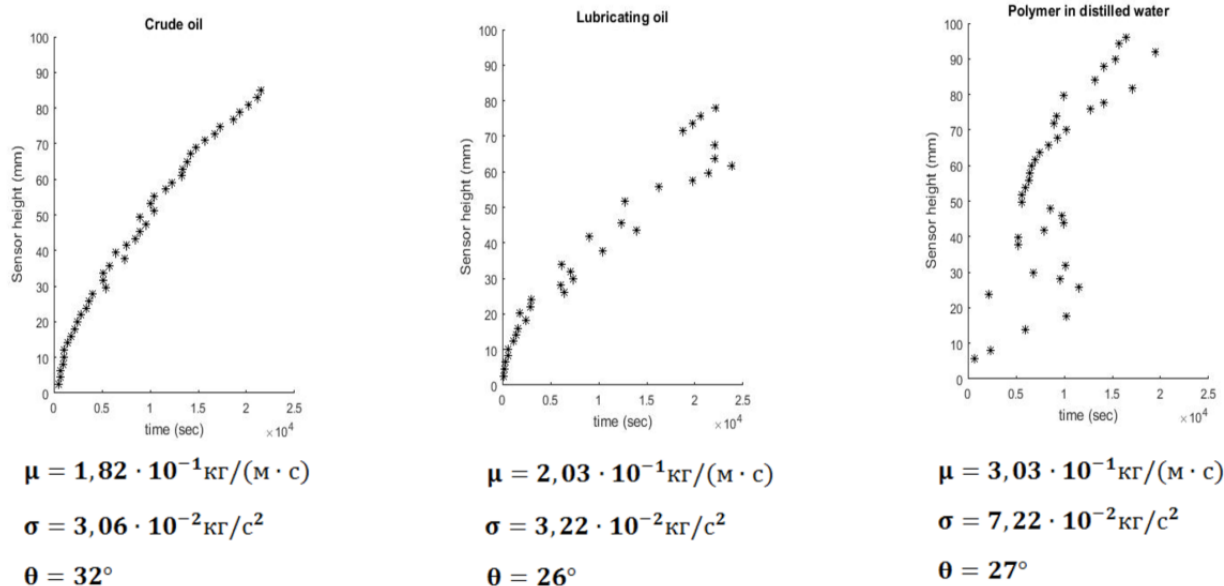


Рис.2.30. Результаты экспериментов по капиллярной пропитке, проведённых на околоземной орбите.

На рис.2.30 просматривается интересная особенность: часто датчик, находящийся на большей высоте, срабатывал раньше, чем датчик, находящийся на меньшей высоте (особенно этот эффект проявляется для раствора полимера в дистиллированной воде). То есть жидкость просачивалась внутрь образца не ровным фронтом, межфазная граница была искривлена. Здесь опять имеет место быть «капиллярная неустойчивость», которая упоминалась выше. При математическом моделировании такого процесса, можно применять метод, описанный в Главе 1 настоящей работы: в уравнения добавляются дополнительные члены, отвечающие за размытие фронта вытеснения за счёт неустойчивости вытеснения и диффузии. По экспериментальным данным можно подобрать эмпирические константы в математической модели для каждой жидкости.

2.6. Математическое и численное моделирование процесса пропитки неоднородной пористой среды с учётом неустойчивости поверхности раздела фаз.

Нелинейное уравнение конвекции-диффузии для пористой среды с учётом капиллярных сил выглядит следующим образом:

$$\varphi \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(F_L - D \frac{\partial s}{\partial x} \right) = 0$$

где s - насыщенность вытесняющей жидкости, φ - пористость, D - коэффициент диффузии, F_L - поток конвекции.

Начальные условия для насыщенности $s(t, x)$:

$$s(0, x) = \begin{cases} s_{max}, & x = 0; \\ s_{min}, & x > 0. \end{cases}$$

Граничные условия:

$$s(t, 0) = s_{max}, \quad \left(\frac{\partial s}{\partial x} \right)_{x=L} = 0$$

где s_{min} и s_{max} - соответственно минимально и максимально возможные насыщенности.

Уравнение конвекции-диффузии с начальным и граничным условиями моделирует процесс, в котором величина s перемещается фронтом вдоль оси x слева направо если поток конвекции положителен ($F > 0$). Коэффициент диффузии D всегда положителен; он ведёт к размыванию фронта.

Эффективная насыщенность S рассчитывается следующим образом:

$$S = \frac{s - s_{min}}{s_{max} - s_{min}}$$

Ниже индекс «O» соответствует вытесняющей жидкости («oil»). Индекс «G» соответствует вытесняемой жидкости («gas»). Безразмерные относительные мобильности M_O и M_G рассчитываются по модели Брукса и Кори:

$$M_O = k_O S^{n_O}, \quad M_G = \frac{\mu_O}{\mu_G} k_G (1 - S)^{n_G}$$

где n_O , k_O , n_G , k_G - эмпирические константы. При моделировании двухфазной фильтрации выражение для F выглядит следующим образом:

$$F_L = -\frac{KM_O}{\mu_O} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{M_O}{M_O + M_G} u(t) \quad (2.12)$$

где $u = -K(M_O + M_G) \frac{\partial p}{\partial x}$ - суммарная объёмная скорость фильтрации.

Дополнительный эффект, связанный с неустойчивостью капиллярных потоков, моделируется добавлением вспомогательного члена к F_L :

$$\begin{aligned} \tilde{F} &= F_L + F_0 ((s - s_{min})(s_{max} - s))^\alpha \\ &= \frac{M_O}{M_O + M_G} u(t) + F_0 ((s - s_{min})(s_{max} - s))^\alpha \end{aligned}$$

Этот дополнительный член пропорционален эмпирическому коэффициенту F_0 . Он усиливает размытие фронта вытеснения. Знак F_0 положителен, так как неустойчивость усиливает поток.

Суммарная скорость фильтрации либо задаётся (контроль потока)

$$u(t) = U_0$$

или рассчитывается с использованием определенного интеграла (контроль давления)

$$u(t) = \frac{K\Delta P_0}{\mu_O} \left[\int_0^L \frac{dx}{M_O + M_G} \right]^{-1}$$

где ΔP_0 - постоянный перепад давления.

Диффузия, образованная капиллярными силами D , выглядит по модели Леверетта :

$$D = \frac{C_J a_J |\cos \theta| \sigma \sqrt{K \varphi} M_O M_G}{\mu_O (s_{max} - s_{min}) (M_O + M_G)} \cdot \begin{cases} S^{-1-a_J}, & \cos \theta > 0; \\ (1 - S)^{-1-a_J}, & \cos \theta < 0; \end{cases}$$

где θ - угол смачиваемости со стороны вытесняющей жидкости, C_J , a_J – параметры функции Леверетта.

Отметим, что дополнительный фактор, пропорциональный коэффициенту F_0 , также определяет дисперсию.

2.7. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными для исследования пропитки на околоземной орбите.

Описанная выше математическая модель позволяет выбрать коэффициенты, отвечающие за размытие фронта, на основе экспериментальных данных. Было получено, что для трех описанных экспериментов оптимальные коэффициенты следующие:

$$\text{Сырая нефть: } C_J = 3 \cdot 10^{-2}, a_J = 0.5, F_0 = 3 \cdot 10^{-8}$$

$$\text{Смазочное масло: } C_J = 1 \cdot 10^{-2}, a_J = 0.5, F_0 = 1.5 \cdot 10^{-7}$$

$$\text{Раствор полимера: } C_J = 5 \cdot 10^{-3}, a_J = 0.5, F_0 = 4.5 \cdot 10^{-7}$$

Перепад давления или заданный поток отсутствовали, так что движение осуществлялось только лишь за счёт капиллярных сил.

Распределение насыщенности вытесняющей жидкости в расчетной области с течением времени показано на рис.2.31. Параметры каждого из трех расчетов соответствовали физическому эксперименту. Экспериментальные данные отмечены черными маркерами.

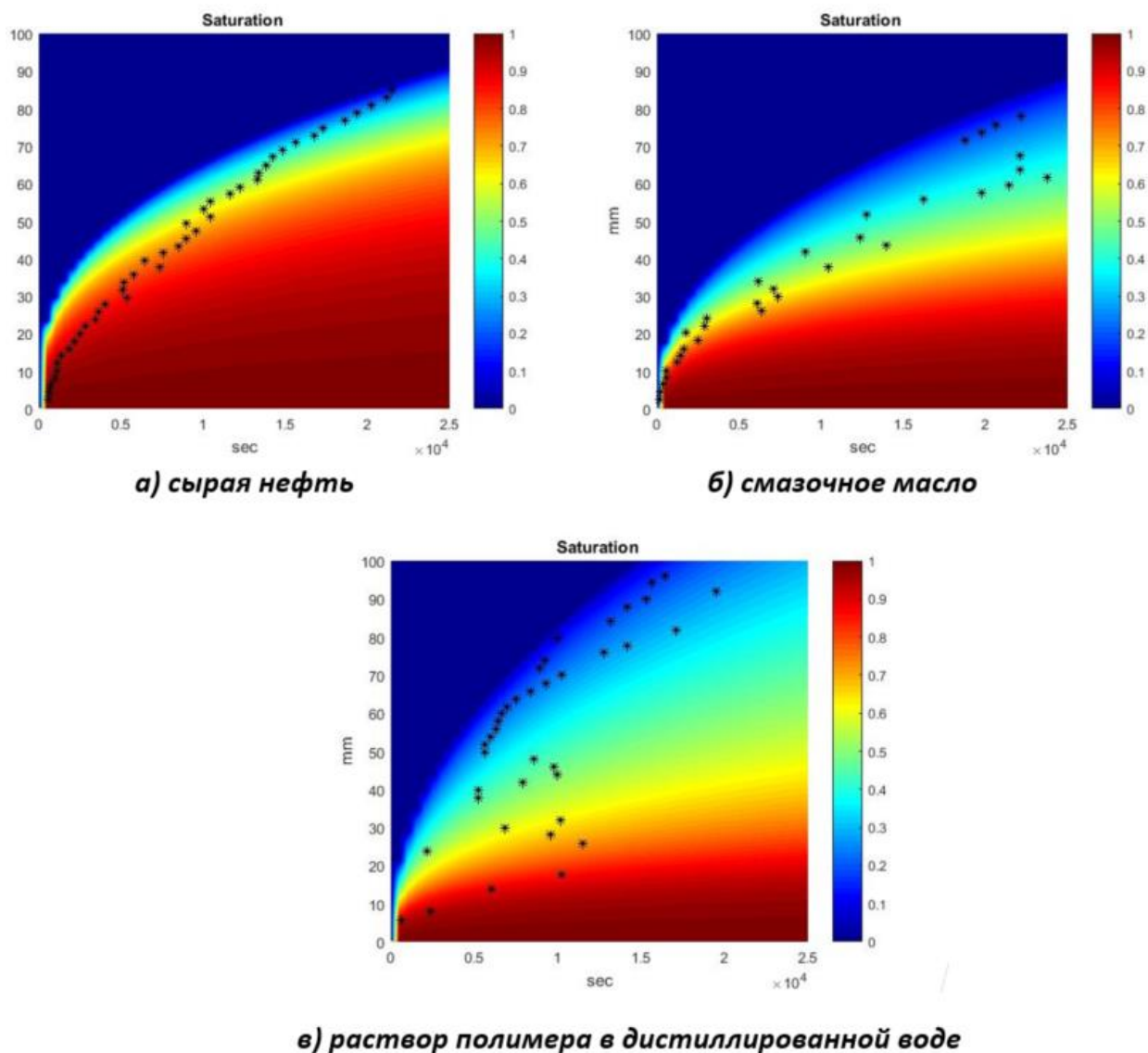


Рис.2.31. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными для исследования пропитки на околоземной орбите.

Таким образом, как видно из рисунка 2.31, результаты численных расчетов на основе предлагаемой математической модели хорошо согласуются с экспериментальными данными. Размытие фронта вытеснения для каждой из жидкостей различно: наименьшее размытие наблюдается в сырой нефти (рис.2.31.а), фронт наиболее сильно размыт в случае фильтрации раствора полимера (рис.2.31.в). Для каждой жидкости выбираются эмпирические константы C_j , a_j и F_0 . Значение a_j для всех жидкостей выбирается равным 0,5. Коэффициенты C_j и F_0 различны для каждого случая, но они имеют один и тот же порядок. Коэффициенты были выбраны таким

образом, что размытие фронта в численном расчете имеет наименьшее отличие от экспериментальных данных.

Также приведём сравнение результатов эксперимента для сырой нефти с численным моделированием, основанным на математической модели, описанной в 2.2 данной главы. Для сравнения был выбран эксперимент именно в сырой нефти, так как в этом наименее выражена капиллярная неустойчивость, а математическая модель из пункта 2.2. не учитывает размытие фронта за счёт дополнительных эффектов.

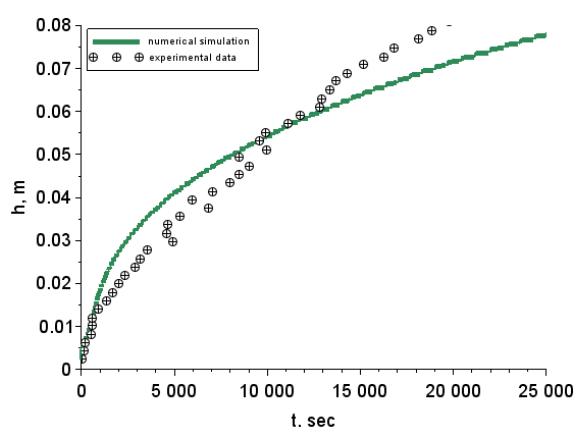


Рис.2.32. Сравнение результатов численного моделирования (без учёта дополнительных членов) с экспериментальными данными для исследования пропитки на околоземной орбите (жидкость – сырая нефть).

На рис.2.32 зеленой линией показан результат численного моделирования процесса пропитки на основе математической модели, не учитывающей дополнительные факторы связанные с неустойчивостью вытеснения. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

2.8. Влияние капиллярных эффектов на двухфазную фильтрацию

Рассмотрим фильтрацию жидкости под влиянием не только капиллярных сил, в случае, когда имеет место перепад давления. Чтобы исследовать влияние типа смачиваемости породы на вытеснение, рассмотрим процессы при различных значениях перепада давления ΔP и различных значениях капиллярного давления.

Чтобы оценить влияние капиллярных эффектов на процесс вытеснения, введем безразмерный параметр ε :

$$\varepsilon = \frac{\tilde{F} \cdot L}{d_c} = \frac{\Delta P \cdot \sqrt{K} \cdot 0.5^{1+a_j-n_G} \cdot \mu_G}{\mu_0 \cdot C_j \cdot a_j \cdot \cos \theta \cdot \sigma \cdot \sqrt{\varphi} \cdot k_G}$$

Исследуем для каких значений параметра ε влияние капиллярных эффектов и типа смачиваемости является значительным и когда ими можно пренебречь.

В этой серии расчетов были использованы эмпирические константы, отобранные на основе эксперимента по потоку жидкости в условиях микрогравитации, описанных выше: $F_0 = 3 \cdot 10^{-8}$, $a_j = 0.5$.

На рис.2.33 представлены результаты расчетов, когда помимо капиллярных сил присутствует постоянный перепад давления $\Delta P = 2.5 \cdot 10^2$. Значения константы C_j , пропорциональные капиллярному давлению, составляли $5 \cdot 10^{-2}$; $5 \cdot 10^{-3}$; $5 \cdot 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-5}$.

С левой стороны тип смачиваемости - гидрофильный, с правой стороны - гидрофобный.

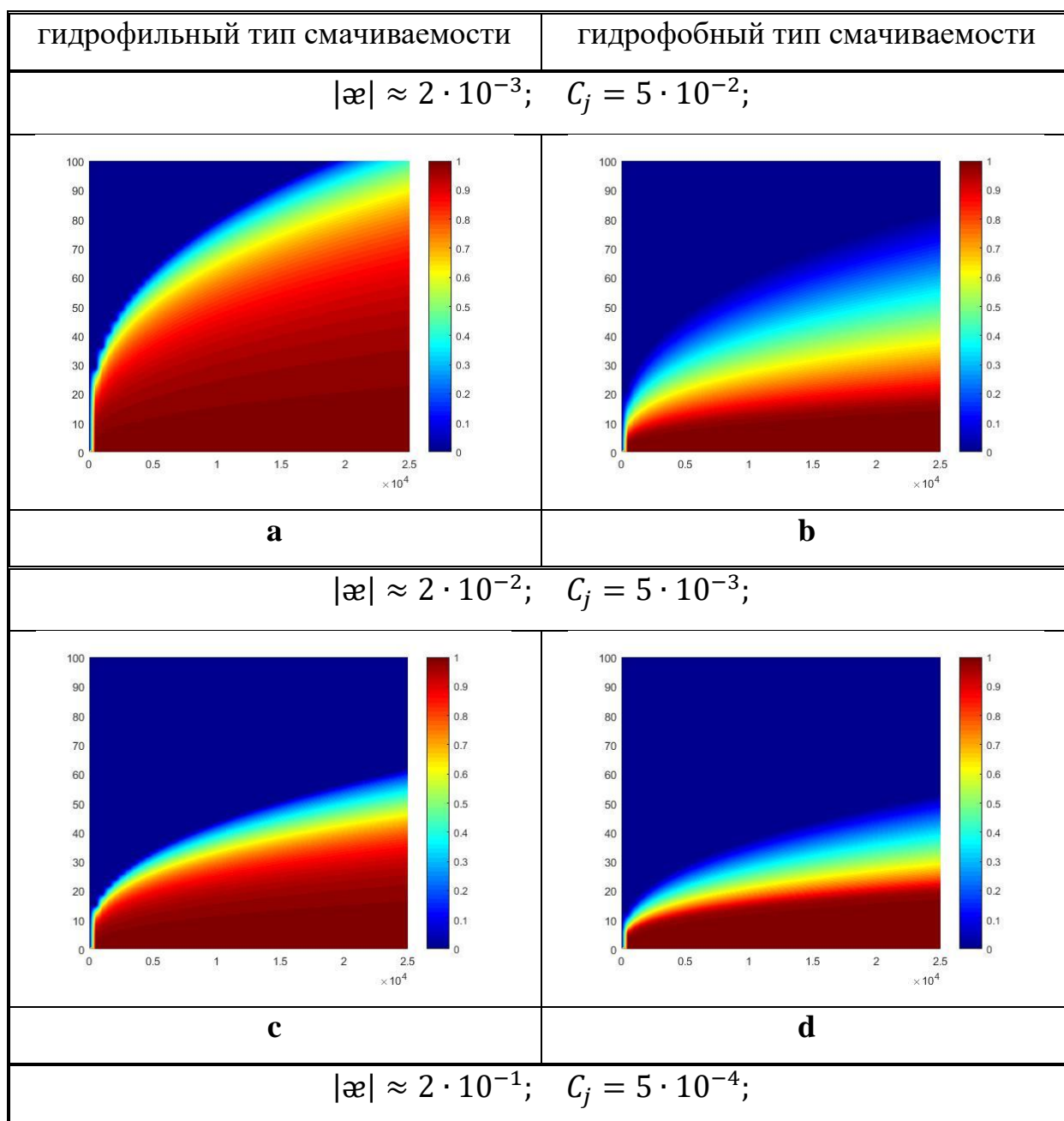
На рис.3.33.a и 3.33.b показан случай, когда параметр ε , отвечающий за связь между конвективной составляющей и капиллярной силой, равен $2 \cdot 10^{-3}$. В этом случае капиллярные эффекты существенно влияют на процесс вытеснения. Гидрофильный тип смачиваемости (рис.3.33.a) приводит к ускорению течения жидкости в пористой среде. Гидрофобный тип смачиваемости (рис.3.33.b) приводит к усилению размытия фронта. Таким образом, если параметр ε имеет порядок 10^{-3} или меньше, капиллярные эффекты значительны и должны быть приняты во внимание.

Как видно из рис.3.33.c и 3.33.d, в случае, когда конвективный поток становится значительно большим, чем капиллярная сила, а коэффициент ε увеличивается, эффект, создаваемый капиллярными силами на процесс, ослабляется. Ускорение течения в случае гидрофильного типа смачиваемости на рис. 3.33.c не так ярко выражено, как на рис.3.33.a. Размытие фронта на рис.3.33.d также значительно уменьшился по сравнению с рис.3.33.b.

На рис.3.33.e и рис.3.33.f, когда $\alpha = 2 \cdot 10^{-1}$, эффекты ускорения течения и размытия фронта едва заметны.

На рис.3.33.g и 3.33.h видно, что результаты расчета для гидрофильного и гидрофобного типа смачиваемости идентичны. Следовательно, можно полностью пренебречь капиллярными эффектами в случае, когда значение параметра α порядка 1 или более.

Таким образом, когда градиент давления достаточно большой и капиллярными силами можно пренебречь тип смачиваемости среды не влияет на процесс вытеснения.



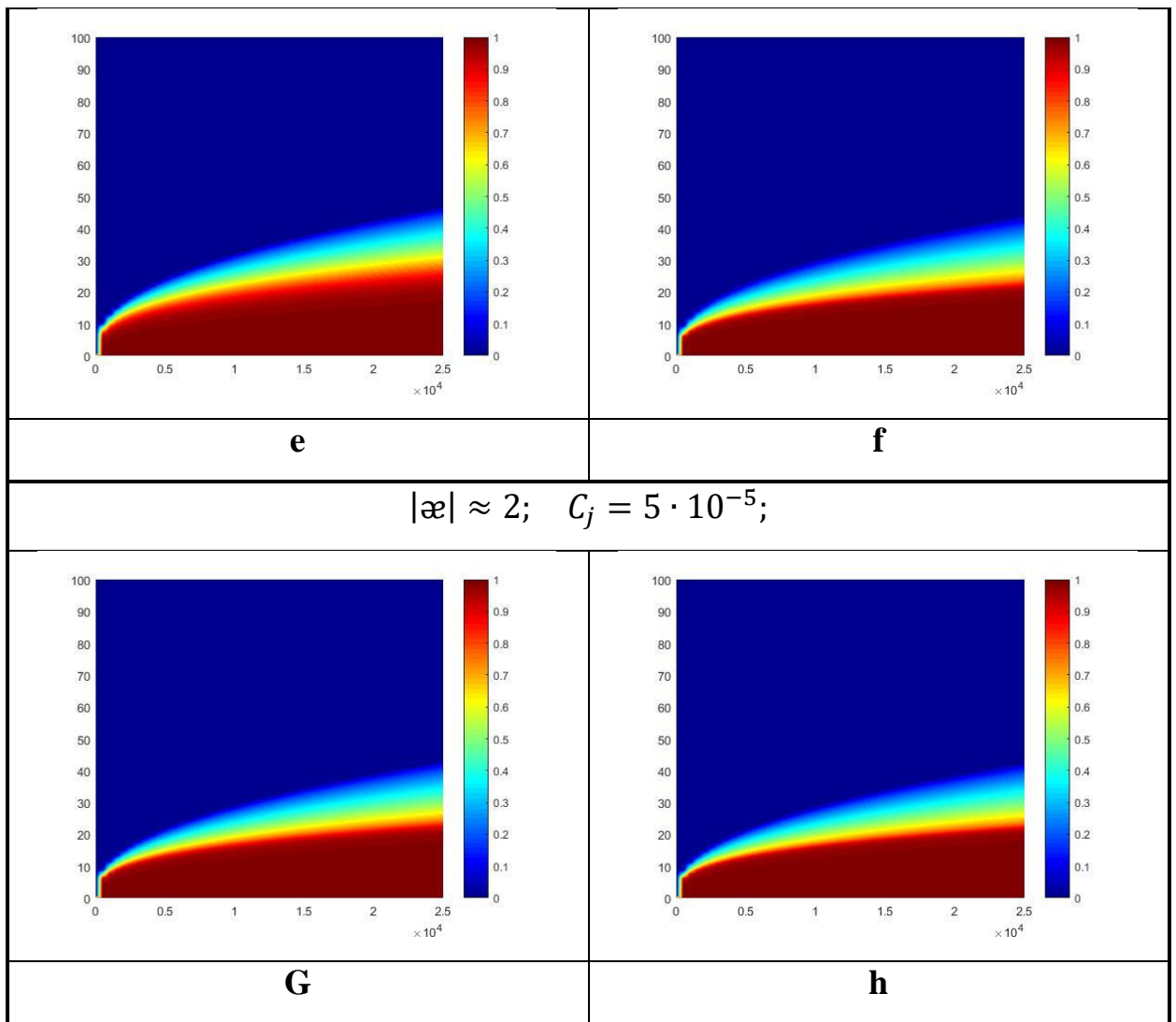


Рис.2.33. Влияние капиллярных эффектов на фильтрацию при различных значениях параметра $\æ$

2.9. Выводы ко второй главе.

1. Описан новый вид неустойчивости вытеснения: «капиллярная неустойчивость». Данная неустойчивость связана с неравномерностью распределения капиллярных характеристик в пористой среде.
2. Проведена обработка данных экспериментов по многократной пропитке пористой среды в условиях микрогравитации во время параболических полётов.
3. Обнаружено, что в однородной среде жидкость поднимается на большую высоту с каждой последующей параболой. Этот эффект

более выражен для менее проницаемой среды, сформированной из более мелких шариков. При переходе из менее проницаемой области в более проницаемую жидкость замедляется; при переходе из области сформированной более крупными шариками в область, состоящую из мелких шариков наблюдается ускорение фронта пропитки. Это связано с тем, что при пересечении границы с разной проницаемостью капиллярная сила изменяется скачком, а сила сопротивления (которая в маленьких шарах важнее, чем в больших) постепенно возрастает с увеличением уровня проникновения жидкости.

4. Разработаны математическая модель и численный алгоритм для моделирования процесса многократной пропитки пористой среды. Разработанная математическая модель учитывает тот факт, что течение в сухой и влажной среде развивается по-разному. По экспериментальным данным течение через сухую среду менее интенсивное, это связано с различием капиллярных характеристик в сухой и влажной пористой среде. Поэтому, если рассматривается процесс, когда режим дренажа многократно сменяется режимом пропитки (как это происходит при параболических полетах), необходимо учитывать эффект гистерезиса.
5. Сравнение численных и экспериментальных данных показало хорошее совпадение. Показана возможность проверки математической модели и программного кода на основе динамических экспериментов в искусственной пористой среде.
6. Показано, что с уменьшением проницаемости среды, увеличивается размытие фронта капиллярной пропитки.
7. Показано, что для высокопроницаемой среды инерционные члены в уравнении импульса оказывают влияние на результат моделирования на начальном этапе пропитки и при прохождении границы зон с различными проницаемостями.

8. Разработана модель, описывающая размытие фронта вытеснения из-за диффузии, капиллярных эффектов и неустойчивости потока; модель использует две эмпирические константы. Эта модель может описывать особенности фронта вытеснения даже в случае одномерного моделирования. Для оценки эмпирических констант были использованы результаты экспериментов в условиях микрогравитации; эти условия необходимы для исключения фактора сил тяжести, влияющего на поток и маскирующего капиллярные эффекты.
9. Было показано, что капиллярные эффекты играют значительную роль только тогда, когда внешний градиент давления достаточно мал по сравнению с капиллярными силами, в противном случае капиллярным фактором можно пренебречь. Был введен безразмерный критерий, характеризующий соотношение вынужденной и капиллярной конвекции. При малых значениях критерия капиллярные силы и смачивающие свойства среды играют существенную роль в процессе вытеснения. При больших значениях критерия процесс практически не зависит от смачивающих свойств жидкости.
10. Проведение микрогравитационных экспериментов по изучению капиллярных эффектов и особенностей течения жидкости в условиях пониженной гравитации представляет большой научный интерес: данные, полученные в результате таких экспериментов, позволяют верифицировать математические модели, а также понять фундаментальные аспекты рассматриваемого явления.

ГЛАВА 3. Вычислительное исследование влияния области повышенной пористости и проницаемости на вытеснение нефти из модельного коллектора.^d

Глава посвящена исследованию влияния наличия и положения области повышенной пористости и проницаемости на процесс фильтрации в пористой среде. Нефтедержащий пористый пласт может содержать как естественные неоднородности проницаемости, так и искусственно созданные (трещина гидроразрыва пласта). В данной главе трещина гидроразрыва пласта будет моделироваться как область повышенной пористости и проницаемости. Одним из важных факторов, который влияет на динамику добычи нефти при помощи вытеснения ее водой, является неустойчивость, которая может развиваться на фронте вытеснения. В главе рассматривается математическая модель, описывающая двухфазную фильтрацию в двумерной прямоугольной

^d При подготовке данной главы диссертации использовались следующие публикации автора, в которых, согласно «Положению о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова», отражены основные результаты, положения и выводы исследования: 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.; Душин В.Р., Никитин В.Ф., Скрылева Е.И. Вычислительное моделирование вытеснения флюида из пористой среды // Вестник кибернетики. — 2017. — № 28.; 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. — с. 397-412; 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». — с. 88-95; 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; 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; 164. Проект «Модели многофазных сред и волновых процессов в природных, технических и социальных системах» Смирнов Н.Н., Стамов Л.И., Дьяков П.А., Захаров П.П., Зубков А.Ф., Ильюшина Е.А., Логвинов О.А., Малашин А.А., Маслов С.А., Михальченко Е.В., Никитин В.Ф., Рыбакин Б.П., Скрылева Е.И., Смирнова М.Н., Тюренкова В.В., Шамина А.А. // <https://istina.msu.ru/projects/323786154/>; 172. Грант РФФИ № 20-07-00378 «Моделирование неустойчивого вытеснения жидкостей из пористых сред с учетом внешних воздействий, направленных на повышение нефтеотдачи» Душин В.Р., Логвинов О.А., Скрылева Е.И., Шамина А.А., <https://istina.msu.ru/projects/341406269/>; 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

области, которая может содержать различное количество нагнетающих и добывающих скважин и трещин гидроразрыва с различным расположением относительно друг друга. При этом особое внимание уделяется влиянию трещины гидроразрыва на процесс добычи нефти и возможность увеличения коэффициента извлечения нефти. Также на базе построенной математической модели исследуется процесс очистки трещины гидроразрыва от жидкости гидроразрыва. На основании результатов численных экспериментов, устанавливается связь качества очистки трещины гидроразрыва, с её геометрическими параметрами трещины и со свойствами жидкости гидроразрыва.

3.1. Математическая модель

Основные свойства математической и численной моделей таковы:

- Рассматривается течение двух несжимаемых флюидов в поровом пространстве, тепловые эффекты не учитываются.
- Просачивание моделируется законом Дарси, с учетом относительных проницаемостей фаз, без учета капиллярных эффектов на стыке фаз.
- Проницаемость и пористость зависят от местоположения. Трещина гидроразрыва моделируется областью повышенной проницаемости и пористости. Кроме того, проницаемость во всей области имеет небольшую случайную «рябь», провоцирующую возникновение неустойчивости вытеснения.
- Математическая постановка задачи описывает вытеснение одним флюидом другого за счет перепада давлений между областями входа и выхода. Внешняя граница непроницаема.
- Численная модель строится на равномерной квадратной сетке. Переменные разнесены: в центрах ячеек определены давление и насыщенности фаз. На гранях (сторонах) ячеек определены компоненты скорости фильтрации фаз. Все уравнения решаются неявно с использованием итерационных методов.

Уравнения баланса

Уравнения баланса массы фазы k записаны без учета межфазного массообмена:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho_k s_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_k u_{k,j}) = 0 \quad (3.1)$$

Здесь $\varphi(x)$ - пористость, ρ_k - истинная плотность фазы, s_k - насыщенность фазы, t - время, $u_{k,j}$ - компонента j скорости фильтрации фазы, x_j - компонента координат точки. В уравнениях (3.1) проводится суммирование по повторяющемуся индексу j . На истинную плотность каждой фазы можно поделить, и параметр ρ_k в дальнейшем исключить. Скелет считаем неподвижным, и пористость выносим за знак производной по времени:

$$\varphi \frac{\partial s_k}{\partial t} + \frac{\partial u_{k,j}}{\partial x_j} = 0 \quad (3.2)$$

Суммарная скорость фильтрации u_j флюида определяется как сумма скоростей фильтрации:

$$u_j = \sum_k u_{k,j} \quad (3.3)$$

Суммирование уравнений (3.2) с использованием определения (3.3) приводит к уравнению неразрывности для скорости u_j , поскольку по определению сумма насыщенностей - единица:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.4)$$

Уравнения импульса сводятся к законам Дарси для фаз:

$$u_{k,j} = - \frac{K k_k^r}{\mu_k} \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (3.5)$$

где k_k^r - относительная проницаемость фазы k , μ_k - динамическая вязкость, $K(x)$ - абсолютная проницаемость, p - давление в порах.

Введем обозначение для относительных мобильностей и доли относительной мобильности фазы:

$$m_k = \frac{k_k^r}{\mu_k}, \quad f_k = \frac{m_k}{\sum_q m_q} \quad (3.6)$$

Пользуясь определениями (3.6) и уравнениями Дарси (3.5), можно выразить суммарную скорость фильтрации через градиент давления и сумму относительных мобильностей, а скорости фильтрации фазы - через суммарную скорость фильтрации и долю мобильности фазы:

$$u_j = -K \sum_q m_q \frac{\partial p}{\partial x_j}, \quad u_{k,j} = f_k u_j \quad (3.7)$$

Пользуясь выражениями (3.7), преобразуем уравнение неразрывности (3.4) для суммарной скорости фильтрации, приведя его к уравнению относительно давления:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \sum_q m_q \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (3.8)$$

Уравнение динамики насыщенности фазы (3.2) с учетом обозначений (3.6) и выражений (3.7) можно преобразовать следующим образом:

$$\frac{\partial s_k}{\partial t} + \varphi^{-1} \frac{\partial}{\partial x_j} (f_k u_j) = 0 \quad (3.9)$$

Результаты этого раздела относятся к совместному течению любого количества фаз, от двух и больше.

Моделирование относительных проницаемостей

Относительные проницаемости k_k^r рассчитываются при помощи модели Брукса - Кори:

$$k_k^r(s_k) = \begin{cases} k_k^0 S_k^{n_k}, & s_k \geq s_k^{res}, \\ 0, & s_k < s_k^{res}, \end{cases} \quad S_k = \frac{s_k - s_k^{res}}{1 - \sum_q s_q^{res}} \quad (3.10)$$

Здесь $k_k^0 > 0$ и $n_k > 0$ - параметры модели Брукса – Кори [31], а приведенная насыщенность фазы S_k ограничивает совместное течение фаз диапазоном, определенным остаточными насыщенностями фаз s_k^{res} :

$$0 \leq s_k^{res} \leq 1, \quad \sum_q s_q^{res} < 1, \quad 0 \leq S_k \leq 1 \quad (3.11)$$

Следует заметить, что при выполнении (3.11) моделируется пористая среда, пропитанная всеми флюидами; пропитка среды фазой при $s_k < s_k^{res}$ этой моделью не описывается. Далее будем везде полагать, что пропитка всеми флюидами имела место, и в этих условиях можно не учитывать нулевую альтернативу (3.10).

Сводка рабочих уравнений и определяющих соотношений модели

Будем считать, что в системе две фазы. Насыщенность s_k и приведенную насыщенность S_k первой фазы будем писать без индекса, а насыщенность второй - выражать через первую. Точно также поступим с долей

относительной мобильности f_k . Введем новые параметры как комбинацию множителя при относительной проницаемости k_k^0 и вязкости μ_k :

$$m_k^0 = \frac{k_k^0}{\mu_k}$$

Запишем в этих обозначениях выражения для относительных мобильностей при помощи модели Брукса - Кори (3.10), и определим суммарную абсолютную мобильность m :

$$\left\{ \begin{array}{l} S = \frac{s - s_1^{res}}{1 - s_1^{res} - s_2^{res}} \\ m = K \cdot [m_1^0 S^{n_1} + m_2^0 (1 - S)^{n_2}] \\ f = \left[1 + \frac{m_2^0 (1 - S)^{n_2}}{m_1^0 S^{n_1}} \right]^{-1} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Давление p получается решением уравнения (3.8), которое с обозначениями (3.12) выглядит как:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(m \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (3.13)$$

Суммарная скорость фильтрации u_j рассчитывается на основе полученного решением (3.13) давления:

$$u_j = -m \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (3.14)$$

Динамика насыщенности первой фазы рассчитывается на основе уравнения (3.9), которое после переписывания выглядит как:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \varphi^{-1} \frac{df}{ds} u_j \frac{\partial s}{\partial x_j} = -\varphi^{-1} f(s) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (3.15)$$

Выражение (3.15) удобно для использования в численном решении тем, что поле скорости u_j соленоидально в случае несжимаемости фаз, и правая часть его в силу (3.4) равна нулю. Производную же df/ds , входящую в левую часть (3.15), можно выразить явно с использованием уже вычисленного значения f и с учетом (3.12) следующим образом:

$$\frac{df}{ds} = \frac{f(1-f)}{1-s_1^{res}-s_2^{res}} \cdot \left(\frac{n_1}{S} + \frac{n_2}{1-S} \right) \quad (3.16)$$

Постановка тестовой задачи

Расчетная область имеет размер $L_x \times L_y$. В точке $(x, y)_{in}$ находится источник, в точке $(x, y)_{out}$ - сток. На источнике задано давление P_{in} , на стоке $P_{out} < P_{in}$. Внешняя граница непроницаема, что вследствие зависимости скорости от давления (3.14) приводит к условию Неймана для давления на ней. Граничное условие по насыщенности вытесняющей жидкости задано при $(x, y)_{in}$; это $s = s_{in} = 1 - s_2^{res}$; других граничных условий для этого параметра нет вследствие того, что уравнение (3.15) имеет первый порядок.

В качестве начальных условий задается $s = s_1^{res}$ везде, кроме источника.

Абсолютная проницаемость задается следующим образом. В окрестности выходной скважины может задаваться трещина гидроразрыва, которая моделируется узкой областью повышенной по сравнению с фоновой проницаемости и пористости. Трещина эта прямая, определяется длиной L и углом своего азимута α , а окрестность - небольшим значением радиуса r . Обозначим множество точек, где эти параметры повышены F .

Тогда имеем:

$$K(x, y) = \begin{cases} K_f, & (x, y) \in F, \\ K_0, & (x, y) \notin F; \end{cases} \quad \varphi(x, y) = \begin{cases} \varphi_f, & (x, y) \in F, \\ \varphi_0, & (x, y) \notin F. \end{cases} \quad (3.17)$$

Здесь множество F можно определить как объединение шаров радиуса r с центрами (x_0, y_0) , где

$$x_0 = x_{out} + L \cos(\alpha) s, \quad y_0 = y_{out} + L \sin(\alpha) s, \quad s \in [-1/2; +1/2].$$

Помимо этого, для возбуждения в системе слабой неустойчивости, которая может развиться в сильную при неустойчивой физической задаче вытеснения, и которая вполне соответствовала бы реальным условиям физической задачи, на проницаемость накладывается слабая случайная «рябь», так что окончательно абсолютная проницаемость определяется как

$$\hat{K} = K \exp(\delta \xi)$$

где ξ - случайная величина, равномерно распределенная в интервале $[-1; +1]$, «разыгрываемая» в каждой ячейке сетки, а δ - достаточно малая величина.

В качестве макропараметров, которые следует определить из решения задачи, основными являются на входе: мгновенный поток первой фазы q_{in} и кумулятивный (накопленный) поток Q_{in} :

$$q_{in,1}(t) = \oint_{\Sigma_{in}} f(s) u_n d\sigma, \quad Q_{in,1}(t) = \int_0^t q_{in}(\tau) d\tau. \quad (3.18)$$

На выходе обеих фаз, мгновенный и кумулятивный:

$$\begin{aligned}
q_{out,1}(t) &= - \oint_{\Sigma_{out}} f(s)u_n d\sigma, & Q_{out,1}(t) &= \int_0^t q_{out,1}(\tau) d\tau \\
q_{out,2}(t) &= - \oint_{\Sigma_{out}} (1-f)u_n d\sigma, & Q_{out,2}(t) &= \int_0^t q_{out,2}(\tau) d\tau
\end{aligned}
\tag{3.19}$$

Здесь Σ_{in} и Σ_{out} - замкнутые поверхности малого размера, охватывающие точки входа и выхода, соответственно, n - внешняя нормаль к этим поверхностям.

3.2. Численная модель

Используется равномерная сетка из прямоугольных ячеек размером h_x, h_y . В центрах ячеек размещаются проницаемость K , пористость φ , насыщенность s , Давление p и все величины, алгебраически с связанные с указанными (приведенная насыщенность, мобильности фаз и прочее). На гранях размещаются компоненты скорости u_j , причем компонента вектора вдоль координаты размещается на грани, нормальной к этой координате. Такое размещение переменных называется разнесенным.

Нумерацию ячеек в настоящей работе будем обозначать двухиндексной символикой; первый индекс соответствует направлению вдоль x , второй вдоль y . Нумерацию граней (сторон) ячеек будем делать двухиндексной относительно центра соответствующей грани, указывая добавку индекса $1/2$ туда, где это необходимо. Некоторые величины в численной модели соответствуют углам ячейки, здесь будет также двухиндексная нумерация. В программной реализации использовалась сплошная нумерация, независимая по ячейкам и граням, так что в работе подобная символика сделана для наглядности.

Дискретизация уравнения для уравнения давления

Для дискретизации уравнения (13) используется схема типа креста, в которой участвует сама ячейка и, может быть, ее соседи через грань, но никакие иные точки. В ячейках, соответствующих входу и выходу, давление задано, а на границе - условие Неймана. Разностная схема второго порядка точности имеет следующий вид в регулярных точках:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h_x^2} \left(\frac{m_{i+1,j} + m_{i,j}}{2} (p_{i,j} - p_{i+1,j}) + \frac{m_{i-1,j} + m_{i,j}}{2} (p_{i,j} - p_{i+1,j}) \right) \\ & + \frac{1}{h_y^2} \left(\frac{m_{i,j+1} + m_{i,j}}{2} (p_{i,j} - p_{i,j+1}) + \frac{m_{i,j-1} + m_{i,j}}{2} (p_{i,j} - p_{i,j-1}) \right) \\ & = 0 \quad (3.20) \end{aligned}$$

Отличия схемы в нерегулярных точках от схемы (3.20) таковы. Если какой-либо из индексов при переменной в этом уравнении попадает за предел рабочей области, то слагаемое, содержащее эту переменную, обнуляется (не используется). Это соответствует граничным условиям Неймана. Кроме того, в точках входа и выхода вместо уравнений (3.20) используются:

$$p_{i,j} = P_{in} | P_{out} \quad (3.21)$$

Дискретизация (3.20) безусловно устойчива, если только мобильность среды $m > 0$. Система уравнений обладает сильно разреженной матрицей без диагонального преобладанием; за счет того, что мобильность - переменная величина, эта матрица не симметрична. Расчет СЛАУ с этой матрицей целесообразно вести одним из методов сопряженных градиентов, например Bi-CGStab.

Дискретизация для получения скорости фильтрации

Скорость фильтрации u_j рассчитывается для каждой компоненты на соответствующей грани. Этот расчет должен быть согласован с

дискретизацией уравнения для давления (3.20), так что он выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} u_{x,i+1/2,j} = \frac{m_{i+1,j} + m_{i,j}}{2} \cdot \frac{p_{i,j} - p_{i+1,j}}{h_x} \\ u_{x,i,j+1/2} = \frac{m_{i,j+1} + m_{i,j}}{2} \cdot \frac{p_{i,j} - p_{i,j+1}}{h_y} \end{cases} \quad (3.22)$$

На границах, замыкающих рабочую область, скорость явно полагается равной нулю, вместо ее вычисления по формулам (3.22). Тем самым реализуется условие непротекания и снимается проблема индексов, выходящих за границу рабочей области.

Расчет продвижения насыщенности

Продвижение насыщенности на новый слой по времени делается на основе уравнения (3.15); перед началом расчета должно быть известно заранее вычисленное значение скорости фильтрации на всех границах.

Для использования метода расчета, описанного в этой работе, уравнение (3.15) должно быть дискретизировано так, чтобы оно имело форму:

$$\begin{aligned} \frac{s_n^+ - s_n^-}{h_t} - \theta \sum_{m \neq n} \lambda_{n,m} (s_m^+ - s_n^+) + \theta \lambda_n^0 s_n^+ \\ = (1 - \theta) \sum_{m \neq n} \lambda_{n,m} (s_m^- - s_n^-) + (1 - \theta) \lambda_n^0 s_n^- \end{aligned} \quad (3.23)$$

Здесь $0 \leq \theta \leq 1$ - весовой коэффициент, характеризующий неявность численной схемы. Для чисто неявной схемы $\theta = 1$, для явной $\theta = 0$, а для схемы Кранка - Николсона $\theta = 1/2$. Индекс n - это обобщение индекса (i, j) ячейки; на практике суммирование ведется по соседним ячейкам, окружающим центральную. Шаблон суммирования в схеме (3.23) может содержать как 5 (схема крест), так и 9 ячеек.

Заметим, что основную проблему в приведении уравнения (3.15) к виду (3.23) представляет лишь дискретизация первой частной производной насыщенности по координатам. Ее можно сделать на 9-точечном шаблоне равномерной декартовой сетки с использованием весов $\omega_0 \geq 0, \omega_1 \geq 0$ следующим способом:

$$\begin{cases} \frac{\partial s}{\partial x} \approx \frac{1}{2h_x} \left(\omega_1 (s_{i+1,j+1} - s_{i-1,j+1}) + \omega_0 (s_{i+1,j} - s_{i-1,j}) + \omega_1 (s_{i+1,j-1} - s_{i-1,j-1}) \right) \\ \frac{\partial s}{\partial y} \approx \frac{1}{2h_y} \left(\omega_1 (s_{i+1,j+1} - s_{i+1,j-1}) + \omega_0 (s_{i,j+1} - s_{i,j-1}) + \omega_1 (s_{i-1,j+1} - s_{i-1,j-1}) \right) \end{cases}$$

При этом должно выполняться $\omega_0 + 2\omega_1 = 1$. При $\omega_1 = 0$ угловые ячейки из расчета исключаются, и получается схема типа «крест». Выверенная же по диагональным направлениям схема на 9-точечном шаблоне получается при следующих значениях весов:

$$\omega_0 = \frac{3}{4}, \quad \omega_1 = \frac{1}{8}$$

Значение λ_n^0 равно приближению 2 порядка от дивергенции скорости u_j с противоположным знаком, и за счет этого обнуляется с той точностью, с которой рассчитывается дискретизованное уравнение для давления. Поэтому точность решения последнего имеет критическое значение - иначе можно получить источник или сток массы.

Уравнение (3.23) с коэффициентами $\lambda_{n,m}$, определенными на основе дискретизации производной (3.24) приводит к неустойчивой в общем случае схеме независимо от величины шага по времени. Для его стабилизации следуем процедуре, использующей метод TVD на основе модификации коэффициентов уравнения с учетом многомерного ограничителя потоков по

Кузьмину. На первом этапе модификации рассчитывается минимальная для линейного случая искусственная диффузия между соседними ячейками n, m :

$$\delta_{n,m} = \max\{0, -\lambda_{n,m}, -\lambda_{m,n}\}$$

Диффузия, определенная (3.25) всегда не отрицательна и симметрична по своим индексам (коэффициенты λ по индексам не обязательно симметричны). Она обеспечивает свойство TVD с минимальной модификацией схемы в рамках линейной модели, то есть без использования в своем построении самого решения, а не только коэффициентов схемы. В рамках линейной модели стабилизации численной схемы лучшего добиться нельзя; это схема 1 порядка по пространству. Улучшения качества численной схемы можно добиться лишь с использованием самого решения, то есть внося нелинейность: коэффициенты диффузии δ уменьшаются настолько, насколько это возможно для сохранения свойства монотонности схемы, величина уменьшения искусственной диффузии называется антидиффузией.

Этап построения антидиффузии является нелинейным. Вначале строятся коэффициенты ограничителей R_n^\pm , соответствующие ячейкам. Для ячейки n вычисляется:

$$\begin{aligned} Q^\pm &= \sum_{m \neq n} \max\{0, \lambda_{n,m}\} \min\{s_m - s_n, 0\} \\ P^\pm &= \sum_{m \neq n} \min\{0, \lambda_{n,m}\} \max\{s_m - s_n, 0\} \\ R_n^\pm &= \max\left\{0, \min\left\{1, \frac{Q^\pm}{P^\pm}\right\}\right\} \end{aligned} \quad (3.26)$$

При этом деления на нуль избегают так, что при нулевых значениях знаменателя в качестве результата для R_n^\pm возвращают нуль. Следует обратить внимание, что в массивах при ячейке промежуточные значения Q^\pm и P^\pm сохранять не обязательно.

Затем на основе коэффициентов схемы $\lambda_{n,m}$, ранее полученных коэффициентов диффузии $\delta_{n,m}$ (3.25) и ограничителей R_n^\pm (3.26) строятся коэффициенты антидиффузии $\alpha_{k,f}$. Расчет ведется с учетом направления потока между ячейками, которое можно оценить без привлечения явного значения скорости, на основе только лишь разности коэффициентов аппроксимации разностной схемы $\lambda_{n,m} - \lambda_{m,n}$:

$$\alpha_{n,m} = \begin{cases} \begin{cases} \min\{R_n^+ \delta_{n,m}, \lambda_{m,n} + \delta_{m,n}\}, & s_n \geq s_m \\ \min\{R_n^- \delta_{n,m}, \lambda_{m,n} + \delta_{m,n}\}, & s_n < s_m \end{cases}, & \lambda_{n,m} \leq \lambda_{m,n} \\ \begin{cases} \min\{R_m^+ \delta_{n,m}, \lambda_{n,m} + \delta_{n,m}\}, & s_m \geq s_n \\ \min\{R_m^- \delta_{n,m}, \lambda_{n,m} + \delta_{n,m}\}, & s_m < s_n \end{cases}, & \lambda_{n,m} > \lambda_{m,n} \end{cases} \quad (3.27)$$

В стабилизированной монотонной схеме, имеющей второй порядок точности по пространству везде, кроме областей сильного градиента решения, вместо коэффициентов схемы $\lambda_{n,m}$ применяются коэффициенты $\lambda_{n,m}^*$, вычисленные на основе поправок δ и α , полученных выражениями (3.25) и (3.27) соответственно:

$$\lambda_{n,m}^* = \lambda_{n,m} + \delta_{n,m} - \alpha_{n,m} \quad (3.28)$$

Описанная выше численная схема замечательна тем, что не зависит от параметров метрики вычислительного шаблона за исключением коэффициентов аппроксимации λ независимо от того, обеспечивают они монотонность схемы или нет. В том случае, когда они ее обеспечивают сразу,

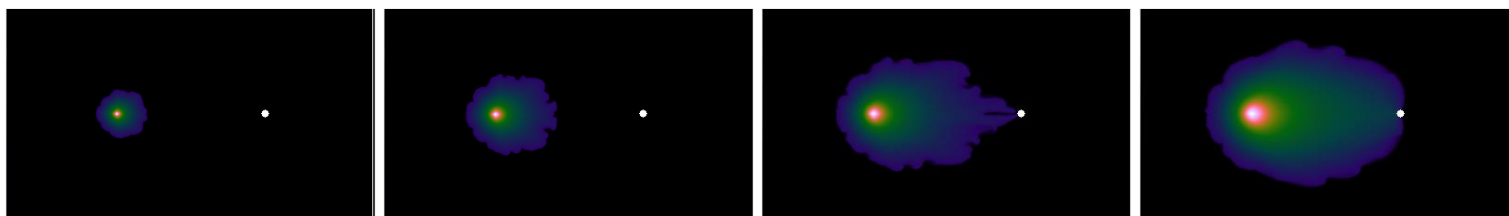
коэффициенты искусственной диффузии и антидиффузии, вычисляемые по вышеприведенным формулам, будут заведомо равны нулю.

3.3. Результаты вычислительного моделирования неустойчивого вытеснения нефти водой с учетом наличия трещины гидроразрыва

Было проведено две серии расчётов, отличающиеся взаимным расположением нагнетающих и добывающей скважин. В каждой серии расчётов рассматривалось различное количество (или отсутствие) и положение трещины гидроразрыва. Целью сравнения результатов было показать, как наличие или отсутствие такого способа интенсификации нефтедобычи, как гидроразрыв пласта, влияет на ее динамику, в том числе на итоговую выработку скважины.

В первой серии расчётов рассматривалась прямоугольная область размером 300м*500м содержащая две скважины(добывающая и нагнетающая) расположенных друг от друга на расстоянии 200м. Около добывающей скважины возможно наличие одной или двух трещин гидроразрыва пласта. Длина каждой трещины составляла 100 метров. Проницаемость и пористость среды равны соответственно $5 \cdot 10^{-13} \text{м}^2$ и 0,2. Проницаемость и пористость трещины соответственно $5 \cdot 10^{-11} \text{м}^2$ и 0,4. Давление на нагнетающих скважинах равно $5 \cdot 10^7 \text{Па}$, на добывающей $5 \cdot 10^5 \text{Па}$. Было проведено 5 расчётов: 1 для отсутствия трещины, 3 для различного положения трещины и 1 для случая двух трещин. На рис.3.1 показана водонасыщенность в различные моменты времени для каждого расчёта (α – угол наклона трещины).

Без трещины



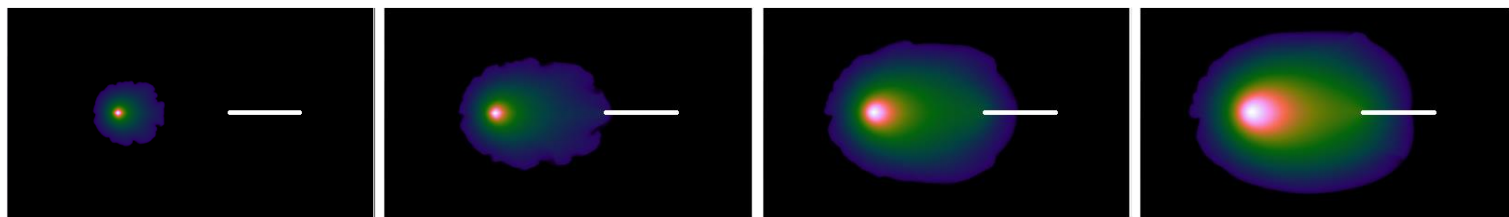
t=2 мес.

t=6 мес.

t=1 год

t=2 года.

$\alpha=0^\circ$



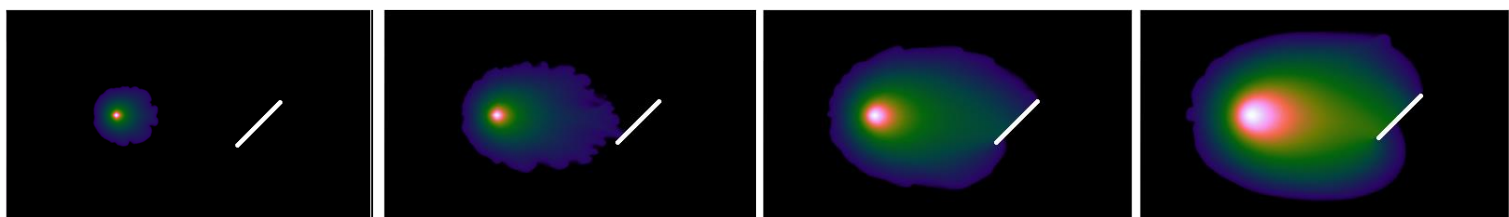
t=2 мес.

t=6 мес.

t=1 год

t=2 года.

$\alpha=45^\circ$



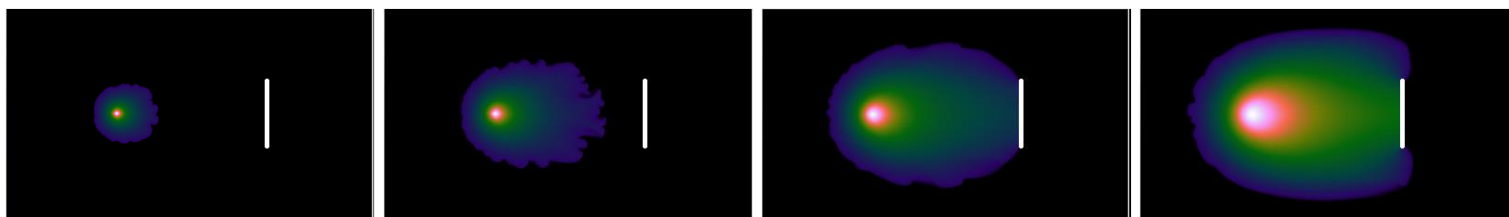
t=2 мес.

t=6 мес.

t=1 год

t=2 года.

$\alpha=90^\circ$



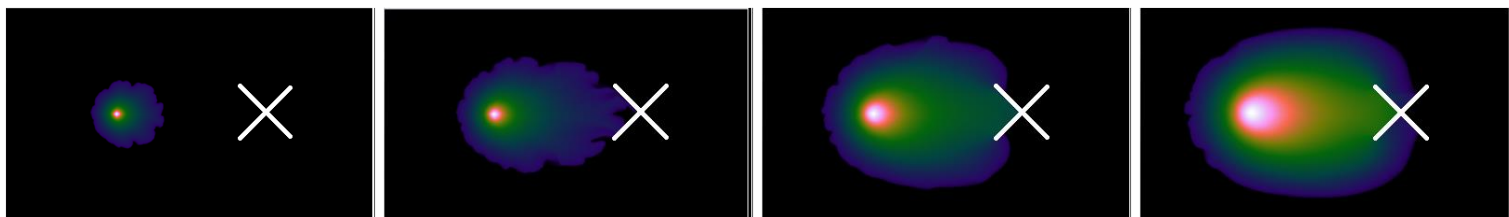
t=2 мес.

t=6 мес.

t=1 год

t=2 года.

Две трещины



t=2 мес.

t=6 мес.

t=1 год

t=2 года.

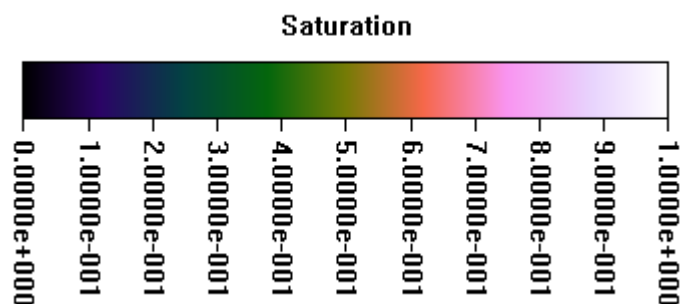


Рис. 3.1. Распределение водонасыщенности с течением времени для случая одной нагнетающей скважины в расчётной области.

Как видно из рис.3.1 в случае отсутствия трещины фронт вытеснения достигает добывающей скважины значительно позже. Разница между расчётами с разным углом наклона трещины незначительна. Случай, когда трещины две не имеет значимых отличий от случаев, когда скважина одна.

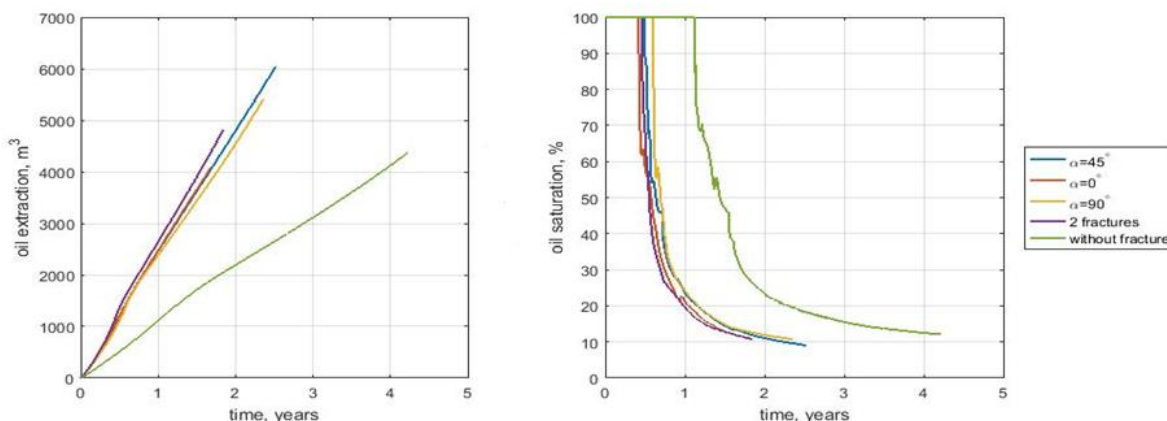


Рис.3.2. Слева - совокупная добыча нефти, в единицах м³ на метр мощности пласта. Справа - доля нефтяной фазы в добыче. Зелёная кривая соответствует случаю, когда трещина отсутствует, синяя – одна трещина($\alpha = 45^\circ$), красная – одна трещина($\alpha = 0^\circ$), жёлтая – одна трещина($\alpha = 90^\circ$), фиолетовая – две трещины.

Как видно из рис.3.2 быстрее всего добыча происходит для двух трещин. В случае, когда трещина одна, имеет значение её положение – случай, когда

трещина ориентирована перпендикулярно линии соединяющей нагнетающую и добывающую скважины добыча происходит медленнее. В случае отсутствия трещины добыча происходит значительно медленнее, чем в остальных случаях (≈ 2 раза). При этом качество добываемой нефти существенно выше, когда трещина отсутствует: время, прошедшее до прорыва воды к добывающей скважине примерно в два раза больше и содержание нефтяной фазы в добыче значительно выше. Наихудшее качество нефти в случае двух трещин.

На рис.3.3 представлена зависимость суммарной добычи нефти от содержания нефтяной фазы в добыче.

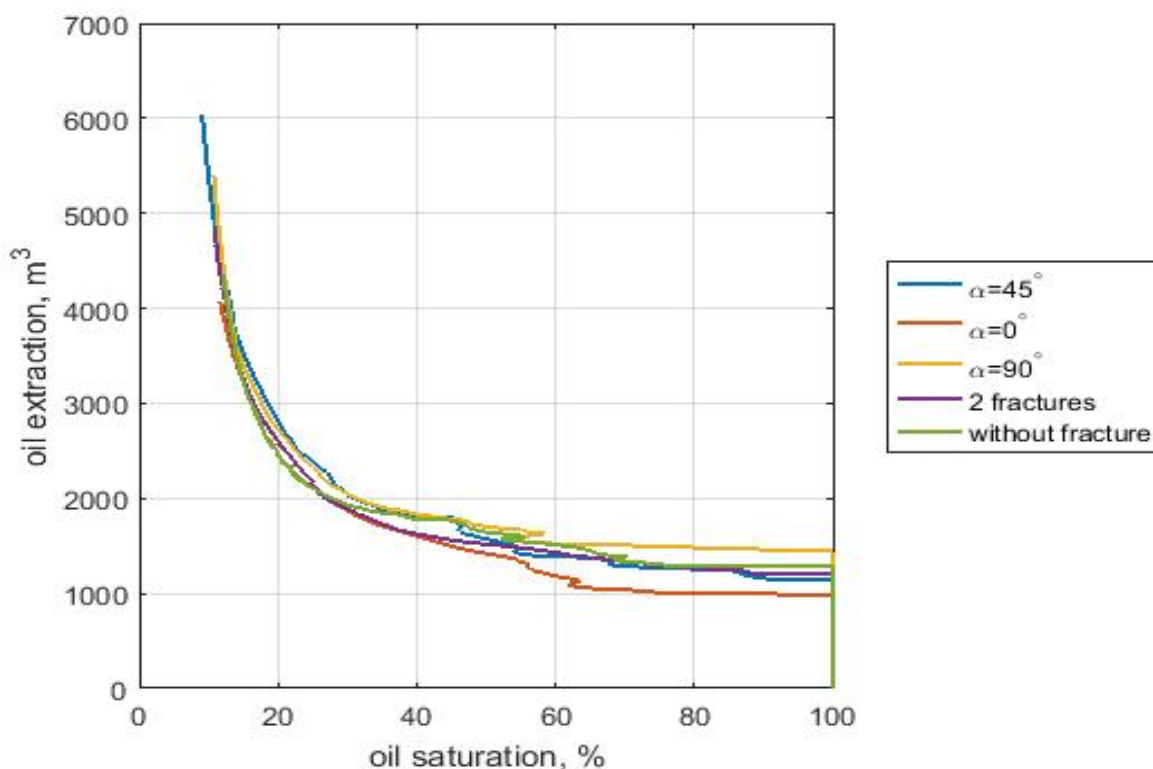
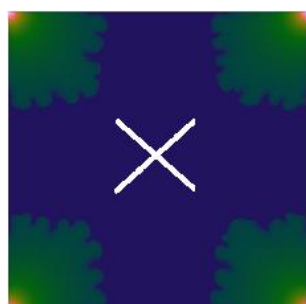


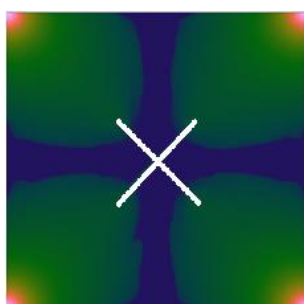
Рис.3.3. Зависимость суммарной добычи нефти от содержания нефтяной фазы в добыче. Зелёная кривая соответствует случаю, когда трещина отсутствует, синяя – одна трещина($\alpha = 45^\circ$), красная – одна трещина($\alpha = 0^\circ$), жёлтая – одна трещина($\alpha = 90^\circ$), фиолетовая – две трещины.

Согласно рис.3.3 на начальном этапе добычи, когда содержание нефтяной фазы велико, положение трещины влияет на процесс вытеснения. В случае, когда $\alpha = 90^\circ$ суммарная добыча нефти значительно выше, чем при $\alpha = 0^\circ$ при одном и том же значении процентного содержания нефтяной фазы в добыче. С течением времени, когда содержание нефтяной фазы снижается, кривые на рис. 3.3 сближаются и можно считать, что количество и положение трещин не влияет на зависимость суммарной добычи от содержания нефтяной фазы. Если считать, что эксплуатация скважины прекращается, когда доля нефтяной фазы в добыче опускается до определенного значения, то согласно рис.3.3 наличие, количество и положение трещин не оказывает существенного влияния на суммарную добычу нефти за всё время эксплуатации скважины. При этом наличие трещины и её «правильное» расположение могут в разы ускорить добычу нефти.

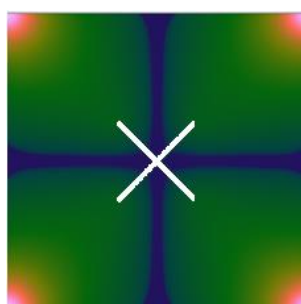
Две трещины, $\alpha=45^\circ$



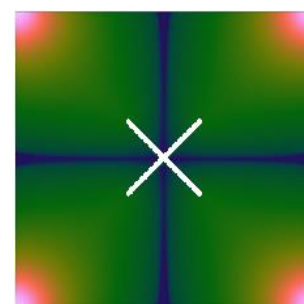
t=3 мес.



t=6 мес.

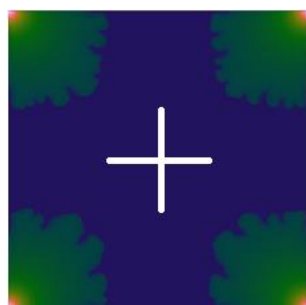


t=9 мес.

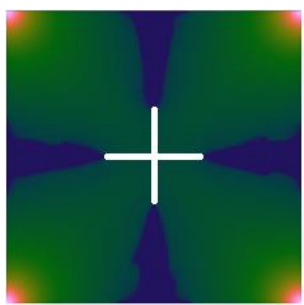


t=1 год.

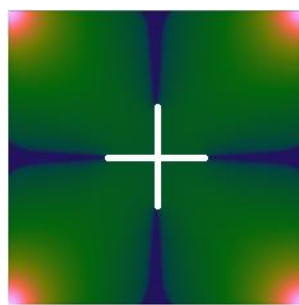
Две трещины, $\alpha=0^\circ$



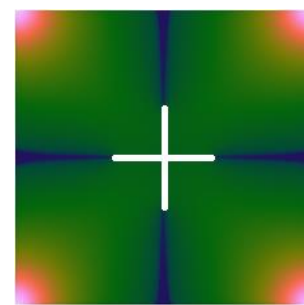
t=3 мес.



t=6 мес.



t=9 мес.



t=1 год.

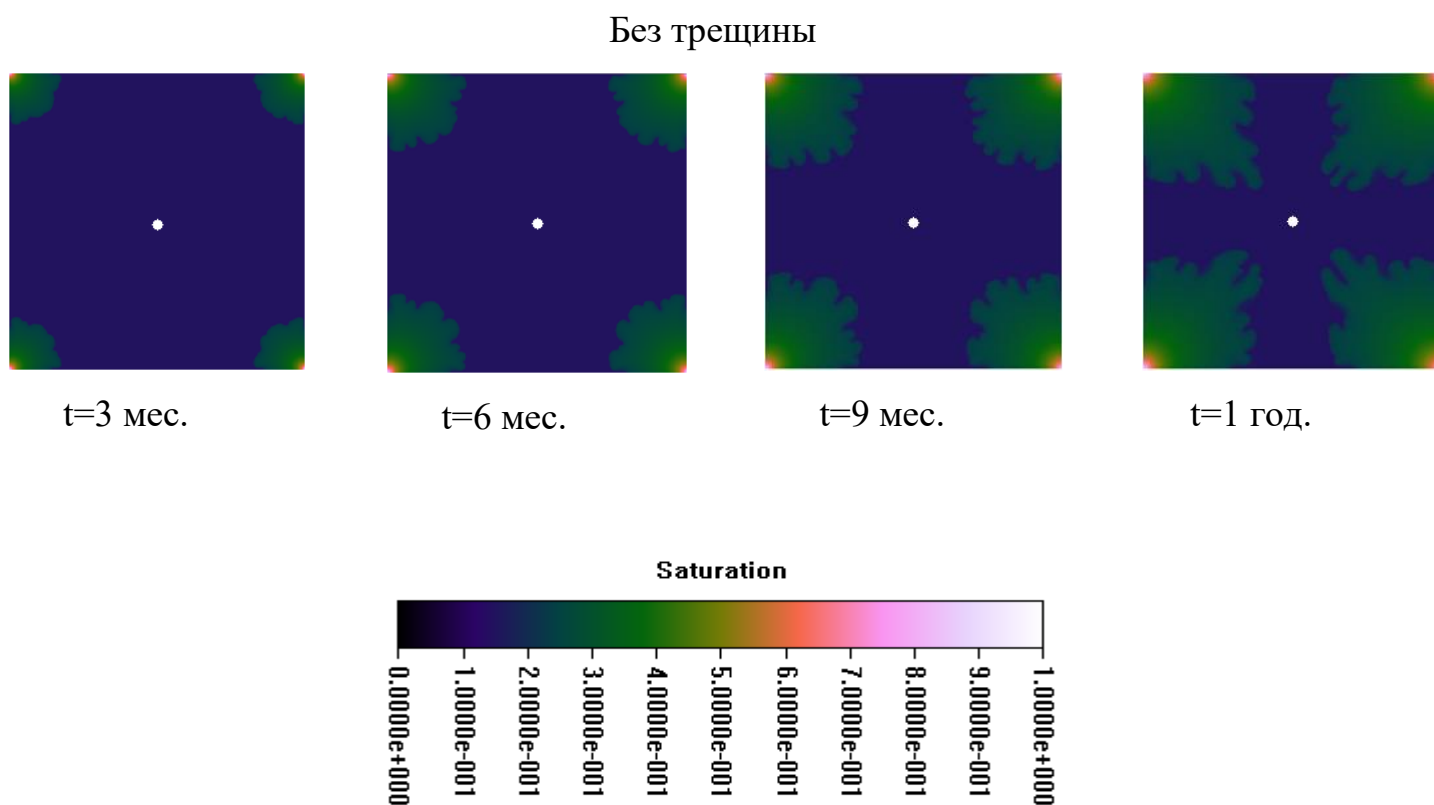


Рис.3.4. Распределение водонасыщенности с течением времени для случая четырёх нагнетающих скважин в расчётной области.

Во второй серии расчётов рассматривается область размером 300м*300м. По углам расположены нагнетающие скважины. В центре области находится добывающая скважина. Около добывающей скважины возможно наличие трещин гидроразрыва пласта. Параметры среды и трещины, а также граничные условия на скважинах совпадают с первой серией расчётов. Было проведено 3 расчёта: 1 для отсутствия трещины, 2 для различного положения двух трещин. На рис. 3.4 показана водонасыщенность в различные моменты времени для каждого расчёта (α – угол наклона трещин).

Таким образом, ориентация трещин гидроразрыва ($\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$) не оказывает влияния на картину вытеснения. В случае же отсутствия трещины фронт вытеснения движется заметно медленнее и за не достигает добывающей скважины за первый год её эксплуатации.

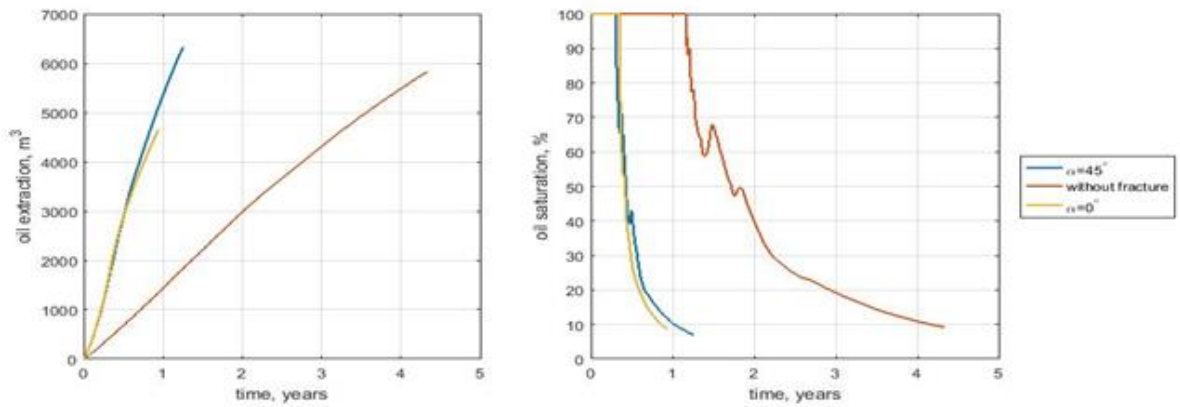


Рис.3.5. Слева - совокупная добыча нефти, в единицах m^3 на метр мощности пласта. Справа - доля нефтяной фазы в добыче. Красная кривая соответствует случаю, когда трещина отсутствует, синяя – две трещины ($\alpha = 45^\circ$), жёлтая – две трещины ($\alpha = 0^\circ$).

Согласно рис. 3.5 в случае, когда трещина гидроразрыва отсутствует добыча нефти происходит значительно медленнее. Ориентация трещин при этом существенной роли не играет. Качество же добытой нефти падает значительно быстрее в случае наличия трещин.

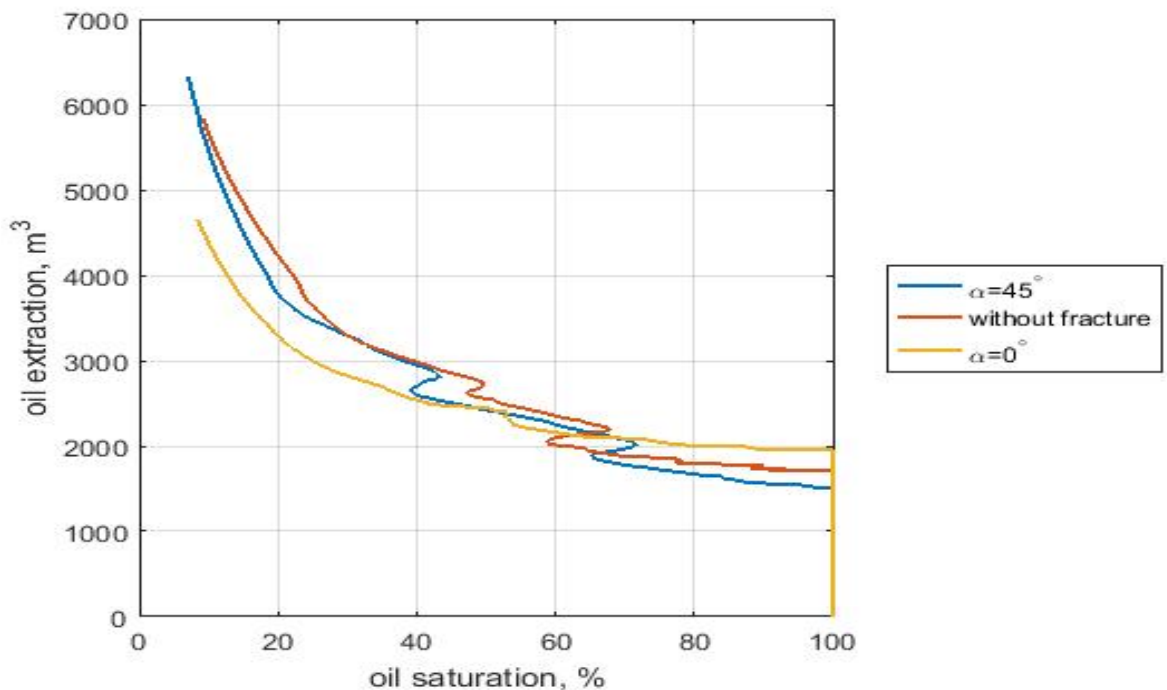


Рис.3.6. Зависимость суммарной добычи нефти от содержания нефтяной фазы в добыче. Красная кривая соответствует случаю, когда трещина отсутствует, синяя – две трещины ($\alpha = 45^\circ$), жёлтая – две трещины ($\alpha = 0^\circ$).

Согласно рис. 3.6 ориентация трещин влияет на процесс вытеснения. В случае, когда $\alpha = 0^\circ$, при небольшом содержании нефтяной фазы в добычи суммарная добыча нефти меньше, чем в других случаях. При этом случай когда трещины отсутствуют не имеет существенных отличий от случая, когда $\alpha = 45^\circ$.

3.4. Результаты вычислительного моделирования процесса очистки трещины гидроразрыва пласта.

Другая модельная проблема, рассматриваемая в данной главе – это процесс очистки трещины гидроразрыва (рис.3.7).

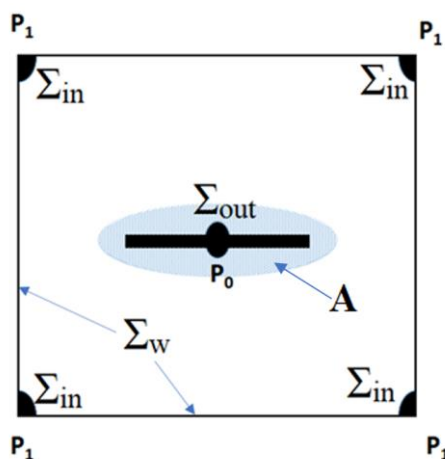


Рис.3.7. Расчетная область при моделировании очистки трещины ГРП

В начальный момент времени резервуар насыщен поровой жидкостью (нефтью). По углам расчетной области расположены 4 нагнетательные скважины под постоянным давлением. В центре области находится

добывающая скважина и трещина гидроразрыва, заполненная пропантом и жидкостью гидроразрыва. Предполагается, что часть жидкости гидроразрыва просочилась в окружающий коллектор, а область, пропитанная данной жидкостью, моделируется эллипсом (область A). Под действием перепада давления жидкость в порах движется в область меньшего давления – к добывающей скважине и наружу. Вязкость жидкости ГРП больше вязкости нефти. В таком случае процесс неустойчив. Внешняя граница непроницаема.

Граничные условия:

$$\Sigma_{in}: \quad s = 0, P = P_{in}$$

$$\Sigma_{out}: \quad P = P_{out} < P_{in}$$

$$\Sigma_w: \quad u_n = 0 \rightarrow \left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0$$

Начальные условия:

$$\begin{cases} s = 1, (x, y) \in A \\ s = 0, (x, y) \notin A \end{cases}$$

Влияние длины трещины на процесс вытеснения нефти из коллектора

Целью первого численного эксперимента было исследование влияния длины трещины ($L_{fracture}$) на процесс очистки трещины. Было проведено два расчета для трещин разной длины. Параметры расчетов приведены в таблице:

Число ячеек в каждом из направлений	$N_x = 1001, N_y = 1001$
Размеры рабочей области	$L_x = 100 \text{ м}, L_y = 100 \text{ м}$
Абсолютная проницаемость пласта	$K_0 = 0.5 \text{ Дарси}$
Пористость пласта	$\varphi_0 = 0.2$

Вязкость нефтяной фазы	$\mu_1 = 0.01 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Вязкость фазы жидкости гидроразрыва	$\mu_2 = 0.1 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Давление в нагнетающих скважинах на уровне пласта	$P_{in} = 500 \text{ атм}$
Давление в добывающей скважине на уровне пласта	$P_{out} = 5 \text{ атм}$
Общая длина трещины	$L_{fracture} = 20 \text{ м}$ / $L_{fracture} = 30 \text{ м}$
Абсолютная проницаемость ячеек, приходящихся на трещину	$K_f = 50 \text{ Дарси}$
Пористость ячеек, приходящихся на трещину	$\varphi_f = 0.4$

Таблица 3.1. Параметры расчетов.

На рис. 3.8. представлена зависимость насыщенности жидкостью гидроразрыва области около трещины от времени. Вначале насыщенность меняется как линейная, после начинает замедляться, однако никогда не выходит на константу: асимптота в данном случае $s = 0$. Поэтому в качестве критерия очистки трещины гидроразрыва от жидкости ГРП можно взять любое достаточно малое или удовлетворительное значение насыщенности. Если считать, что трещина очистилась, когда насыщенность жидкостью ГРП достигла значения 0.2, то очистка трещины длиной 20 м заняла приблизительно 5 дней 8 часов, а очистка трещины длиной 30 м – 9 дней 13 часов. Получается, что отношение составляет 1,79.

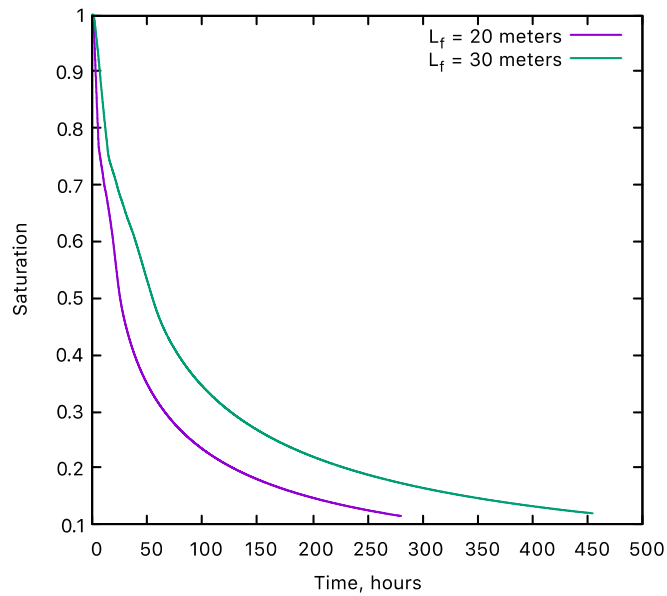


Рис.3.8. Зависимость насыщенности жидкостью гидроразрыва области около трещины от времени

На рис.3.9-3.11 показано распределение скорости фильтрации нефти для различных моментов времени. Неустойчивость вытеснения наблюдается в каждый из рассмотренных моментов времени.

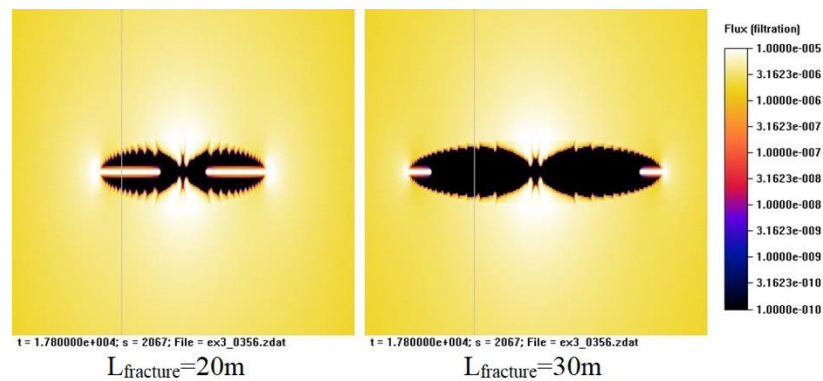


Рис. 3.9. Распределение скорости фильтрации через 5 часов после начала очистки.

На рис.3.9 наибольшие потоки наблюдаются в трещине гидроразрыва, а также в верхней и нижней областях около добывающей скважины. Видно, что для большей трещины жидкость утекает быстрее в области у скважины.

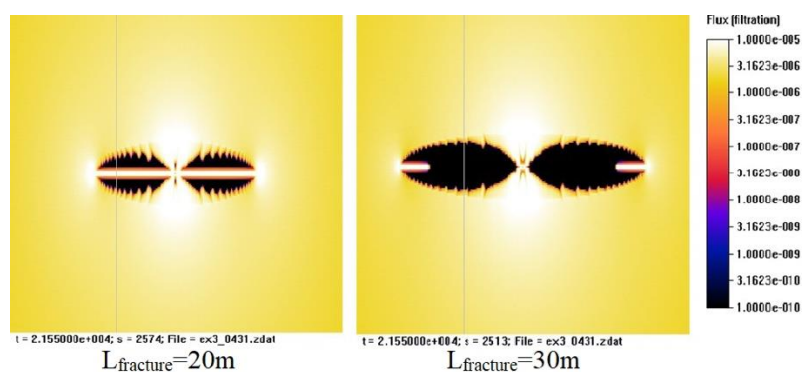


Рис.3.10. Распределение скорости фильтрации через 6 часов после начала очистки.

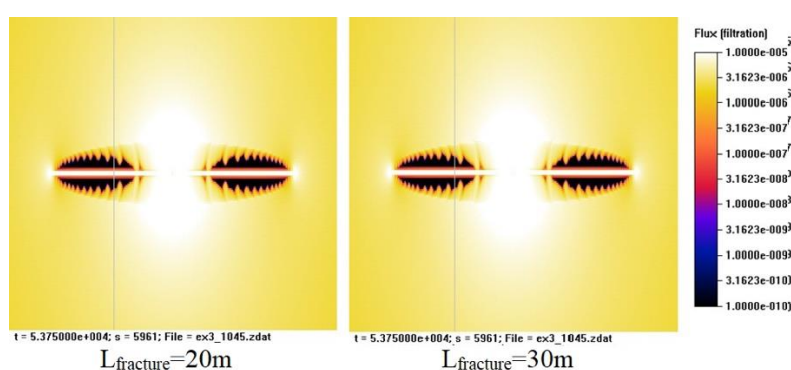


Рис.3.11. Распределение скорости фильтрации через 15 часов после начала очистки.

На рис. 5 в случае $L_f = 20$ м течение происходит по всей длине трещины. Для более длинной трещины прорыв произошел через область, окружающую скважину, а не через трещину. В этом случае не вся трещина задействована в процессе фильтрации. На рис. 6 видно, что практически во всей области происходит фильтрация. Много нефти скопилось в области у скважины, продолжая, таким образом, перетекать в нее. Однако существуют области, которые слабо изменились: в них аккумулярование нефти и вытеснение жидкости ГРП происходят очень медленно.

Влияние вязкости жидкости ГРП на динамику вытеснения.

Целью следующего численного эксперимента является исследование влияния вязкости жидкости гидроразрыва (μ_2) на динамику вытеснения. Было

проведено два расчета для жидкостей ГРП с различной вязкостью. Параметры расчетов приведены в таблице:

Число ячеек в каждом из направлений	$N_x = 1001, N_y = 1001$
Размеры рабочей области	$L_x = 100 \text{ м}, L_y = 100 \text{ м}$
Абсолютная проницаемость пласта	$K_0 = 0.5 \text{ Дарси}$
Пористость пласта	$\varphi_0 = 0.2$
Вязкость нефтяной фазы	$\mu_1 = 0.01 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Вязкость фазы жидкости гидроразрыва	$\mu_2 = 0.1 \text{ Па} \cdot \text{с} / \mu_2 = 0.08 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Давление в нагнетающих скважинах на уровне пласта	$P_{in} = 500 \text{ атм}$
Давление в добывающей скважине на уровне пласта	$P_{out} = 5 \text{ атм}$
Общая длина трещины	$L_{fracture} = 20 \text{ м}$
Абсолютная проницаемость ячеек, приходящихся на трещину	$K_f = 50 \text{ Дарси}$
Пористость ячеек, приходящихся на трещину	$\varphi_f = 0.4$

Таблица 3.2. Параметры расчетов.

На рис.3.12 видно, как изменяется насыщенность жидкостью ГРП в эллиптической области со временем. На каждом графике можно выделить три части. Сначала график ведет себя как линейный, этот участок заканчивается после прорыва нефти к добывающей скважине. Далее идет выпуклый промежуток, за которым следует вогнутый.

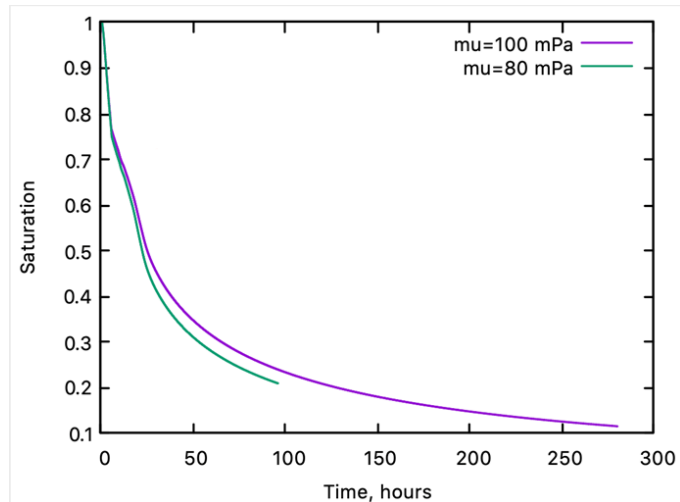


Рис.3.12. Зависимость насыщенности жидкости ГРП в эллиптической зоне от времени.

На выпуклом участке сначала идет небольшое падение скорости вытеснения, однако после этого вновь ее увеличение. Это явление можно объяснить тем, что в течение этого промежутка времени жидкость вытесняется из тех областей, которые ранее не были задействованы. Эти области показаны на рис.3.13. Затем, когда эти труднодоступные области частично очищаются, вытеснение снова замедляется.

Для рассмотренных случаев разница между двумя графиками (рис.3.12) не является существенной. На протяжении всего периода очистки разница составляла не более 3-4%.

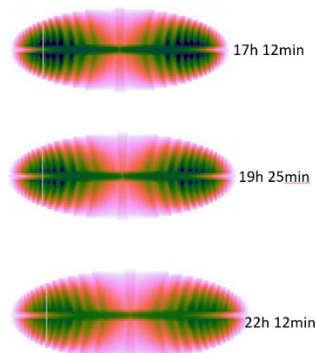


Рис.3.13. Распределение насыщенности в разные моменты времени.

На рис.3.14 мы можем наблюдать наличие прорыва в случае жидкости ГРП с высокой вязкостью и его отсутствие в случае с низкой вязкостью. Получается, что прорыв для жидкости с большей вязкостью происходит раньше, чем для жидкости с низкой вязкостью. Если жидкость для гидроразрыва обладает высокой вязкостью, то возможен прорыв вблизи эксплуатационной скважины. В таком случае гидроразрыв не работает, трещина не участвует в процессе фильтрации.

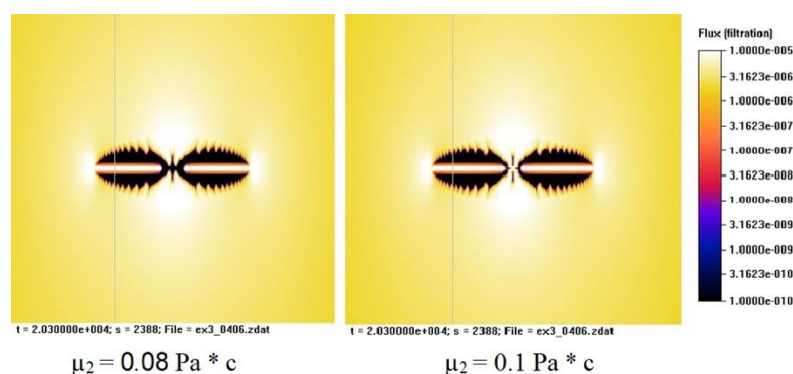


Рис.3.14. Скорость фильтрации нефти примерно через 5 часов 38 минут после начала очистки.

3.5. Выводы к четвёртой главе.

1. Разработана математическая модель и программный код для исследования процесса неустойчивого вытеснения нефти из пористого пласта, содержащего область повышенной проницаемости, моделирующую трещину гидроразрыва.
2. Исследование влияния области повышенной проницаемости пласта на процесс нефтедобычи показало, что наличие трещины ускоряет вытеснение нефти, при этом суммарное количество добытой нефти не изменяется. Таким образом, трещина гидроразрыва не приводит к увеличению нефтеотдачи пласта, а лишь интенсифицирует процесс нефтедобычи.

3. Показано, что ориентация трещины гидроразрыва может существенно влиять на динамику вытеснения.
4. На начальном этапе эксплуатации месторождения выгоднее добывать нефть при наличии одной или двух трещин гидроразрыва.
5. Содержание нефти в извлекаемой жидкости значительно не отличается в случае наличия одной или двух трещин гидроразрыва, но оно падает быстрее, чем в случае отсутствия трещины.
6. В малых трещинах гидроразрыва процесс очистки трещины идет быстрее и процесс фильтрации происходит более равномерно.
7. В случае, когда жидкость гидроразрыва имеет более высокую вязкость, чем вытесняющий агент, возможно, что прорыв произойдет около скважины, а не через трещину. То есть трещина гидроразрыва пласта оказывается не полностью подключенной к процессу сбора нефти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Диссертация посвящена исследованию неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды. В работе предложены новые математические модели, представлены результаты численного моделирования, валидированного на основе экспериментальных исследований. Выявлено влияние различных определяющих параметров на динамику просачивания сквозь пористую среду.

В диссертации были получены следующие важные результаты:

- В результате сравнительного анализа данных обработки экспериментальных исследований, были показаны возможности для определения неизвестных параметров модели, а именно капиллярных характеристик горных пород и насыщающих жидкостей. На основании экспериментальных данных определены коэффициенты в математических моделях и исследовано развитие фронта вытеснения для различных параметров.
- Предложен новый метод для подсчёта площади изоповерхностей. Данный метод можно применять для расчёта площади нерегулярных межфазовых поверхностей при моделировании неустойчивого вытеснения из пористой среды. Проведён анализ эволюции поверхности раздела фаз для расчётов с различными определяющими параметрами в том числе для расчётов соответствующим экспериментам.
- Было показано, что в случае, когда отношение вязкостей жидкостей около 1, вытеснение близко к поршневому. Неустойчивость в этом случае не развивается, случайные отклонения от плоской формы сглаживаются стабилизирующими факторами. В случае, когда отношение вязкостей больше 1, развивается неустойчивость и площадь поверхности раздела жидкостей увеличивается, затем достигнув некоторого максимального значения, после прорыва первого «вязкого пальца» резко падает.

- Показано, что чем выше значение отношения вязкостей, тем большего значения достигает площадь раздела фаз. Также показано, что неустойчивость фронта возрастает с ростом числа Пекле и для фильтрации при постоянном перепаде давления, чем выше перепад давления, тем сильнее развивается неустойчивость, а фронт доходит до границы быстрее.
- Предложен новый метод учёта подсеточной неустойчивости при моделировании процессов поземной гидромеханики, направленный на повышение точности расчетов и сокращение времени их проведения при построении реальной модели прогнозирования протекания процессов в нефтесодержащих пластах. Метод заключается в изменении модели на макроуровне за счёт дополнительных потоков в уравнениях в зависимости от физических свойств, полученных при исследовании процесса на микроуровне.
- Показано, что отличие распределения насыщенности в расчётной области для двумерных и трёхмерных расчётов не превосходит 10%.
- Разработана математическая модель прогностического моделирования процесса вытеснения нефти термогазовым методом повышения нефтеотдачи. Модель позволяет учитывать подсеточную неустойчивость при двумерном или трехмерном моделировании процесса вытеснения, а также позволяет учесть размытие фронта за счёт дополнительных факторов, связанных с диффузией и неустойчивостью, даже при одномерном моделировании. Найдена явная приближенная функциональная форма для коэффициентов потока смешения и коэффициента диффузии.
- Показано в численных экспериментах, 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. Это доказывает эффективность использования термогазового метода для повышения нефтеотдачи. Показано, что в случае вытеснения с учетом экзотермических химических реакций, на динамику вытеснения существенно влияют дополнительные факторы, связанные с подсеточной неустойчивостью.

- Описан новый вид неустойчивости вытеснения: «капиллярная неустойчивость». Данная неустойчивость связана с неравномерностью распределения капиллярных характеристик в пористой среде.
- Проведена обработка данных экспериментов по многократной пропитке пористой среды в условиях микрогравитации во время параболических полётов.
- Обнаружено, что в однородной среде жидкость поднимается на большую высоту с каждой последующей параболой. Этот эффект более выражен для менее проницаемой среды, сформированной из более мелких шариков. При переходе из менее проницаемой области в более проницаемую жидкость замедляется; при переходе из области сформированной более крупными шариками в область, состоящую из мелких шариков наблюдается ускорение фронта пропитки. Это связано с тем, что при пересечении границы с разной проницаемостью капиллярная сила изменяется скачком, а сила сопротивления (которая в маленьких шарах важнее, чем в больших) постепенно возрастает с увеличением уровня проникновения жидкости.
- Разработаны математическая модель и численный алгоритм для моделирования процесса многократной пропитки пористой среды. Разработанная математическая модель учитывает тот факт, что течение в сухой и влажной среде развивается по-разному. По экспериментальным данным течение через сухую среду менее интенсивное, это связано с различием капиллярных характеристик в

сухой и влажной пористой среде. Поэтому, если рассматривается процесс, когда режим дренажа многократно сменяется режимом пропитки (как это происходит при параболических полетах), необходимо учитывать эффект гистерезиса.

- Сравнение численных и экспериментальных данных показало хорошее совпадение. Показана возможность проверки математической модели и программного кода на основе динамических экспериментов в искусственной пористой среде.
- Показано, что с уменьшением проницаемости среды, увеличивается размытие фронта капиллярной пропитки.
- Показано, что для высокопроницаемой среды инерционные члены в уравнении импульса оказывают влияние на результат моделирования на начальном этапе пропитки и при прохождении границы зон с различными проницаемостями.
- Разработана модель, описывающая размытие фронта вытеснения из-за диффузии, капиллярных эффектов и неустойчивости потока; модель использует две эмпирические константы. Эта модель может описывать особенности фронта вытеснения даже в случае одномерного моделирования. Для оценки эмпирических констант были использованы результаты экспериментов в условиях микрогравитации; эти условия необходимы для исключения фактора сил тяжести, влияющего на поток и маскирующего капиллярные эффекты.
- Было показано, что капиллярные эффекты играют значительную роль только тогда, когда внешний градиент давления достаточно мал по сравнению с капиллярными силами, в противном случае капиллярным фактором можно пренебречь. Был введен безразмерный критерий, характеризующий соотношение вынужденной и капиллярной конвекции. При малых значениях критерия капиллярные силы и смачивающие свойства среды играют

существенную роль в процессе вытеснения. При больших значениях критерия процесс практически не зависит от смачивающих свойств жидкости.

- Проведение микрогравитационных экспериментов по изучению капиллярных эффектов и особенностей течения жидкости в условиях пониженной гравитации представляет большой научный интерес: данные, полученные в результате таких экспериментов, позволяют верифицировать математические модели, а также понять фундаментальные аспекты рассматриваемого явления.
- Разработана математическая модель и программный код для исследования процесса неустойчивого вытеснения нефти из пористого пласта, содержащего область повышенной проницаемости, моделирующую трещину гидроразрыва.
- Исследование влияния области повышенной проницаемости пласта на процесс нефтедобычи показало, что наличие трещины ускоряет вытеснение нефти, при этом суммарное количество добытой нефти не изменяется. Таким образом, трещина гидроразрыва не приводит к увеличению нефтеотдачи пласта, а лишь интенсифицирует процесс нефтедобычи.
- Показано, что ориентация трещины гидроразрыва может существенно влиять на динамику вытеснения.
- На начальном этапе эксплуатации месторождения выгоднее добывать нефть при наличии одной или двух трещин гидроразрыва.
- Содержание нефти в извлекаемой жидкости значительно не отличается в случае наличия одной или двух трещин гидроразрыва, но оно падает быстрее, чем в случае отсутствия трещины.
- 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 произойдет

около скважины, а не через трещину. То есть трещина гидроразрыва пласта оказывается не полностью подключенной к процессу сбора нефти.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Анализ размерностей в определяющей системе уравнений

Система уравнений:

- 1) Уравнение баланса массы

$$\frac{\partial \phi \rho}{\partial t} + \nabla \phi \rho \mathbf{v} = 0$$

- 2) Уравнение баланса импульса

$$\frac{\partial \phi \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \rho \mathbf{v}^2) = -\phi \nabla \cdot \mathbf{p} + \phi \rho \mathbf{g} - \phi \frac{\mu}{K} \mathbf{v} + \phi \mu \Delta \mathbf{v}$$

- 3) Уравнение баланса энергии для скелета

$$\frac{\partial (1 - \phi) \rho_s E_s(T_s)}{\partial t} = -\nabla q_s(T_s) - \Delta Q(T, T_s);$$

- 4) Уравнение баланса энергии для флюида

$$\frac{\partial \phi \rho E(p, T)}{\partial t} + \nabla (\rho \mathbf{v} c_V T) = -\nabla q(T) + \Delta Q(T, T_s) + \Delta Q_r(\dot{\omega});$$

Введём характерные параметры, знаком « $\hat{}$ » обозначены безразмерные величины:

$$\rho = \rho_x \hat{\rho}$$

$$x = L \hat{x}$$

$$\mathbf{v} = v_x \hat{\mathbf{v}} = \frac{K_x p_x}{\mu_x L} \hat{\mathbf{v}}$$

$$K = K_x \hat{K}$$

$$\mu = \mu_x \hat{\mu}$$

$$p = p_x \hat{p}$$

$$t = t_x \hat{t} = \frac{\mu_x L^2}{K_x p_x} \hat{t}$$

$$\mathbf{g} = g_x \hat{\mathbf{g}}$$

$$T = T_x \hat{T}$$

$$T_s = T_{s_x} \hat{T}_s$$

I. Обезразмеривание уравнения баланса массы

$$\frac{\rho_x K_x p_x}{\mu_x L^2} \frac{\partial \varphi \hat{\rho}}{\partial \hat{t}} + \frac{\rho_x K_x p_x}{\mu_x L^2} \hat{\nabla} \varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{v}} = 0 \quad \left| : \frac{\rho_x K_x p_x}{\mu_x L^2} \right.$$

$$\frac{\partial \varphi \hat{\rho}}{\partial \hat{t}} + \hat{\nabla} \varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{v}} = 0$$

II. Обезразмеривание уравнения баланса импульса

$$\begin{aligned} \frac{\rho_x K_x^2 p_x^2}{\mu_x^2 L^3} \frac{\partial \varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{v}}}{\partial \hat{t}} + \frac{\rho_x K_x^2 p_x^2}{\mu_x^2 L^3} \hat{\nabla} \cdot (\varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{v}}^2) \\ = -\frac{p_x}{L} \varphi \hat{\nabla} \cdot \hat{\rho} + \rho_x g_x \varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{g}} - \frac{p_x}{L} \varphi \frac{\hat{\mu}}{\hat{K}} \hat{\mathbf{v}} + \frac{K_x p_x}{L^3} \varphi \hat{\mu} \hat{\Delta} \hat{\mathbf{v}} \quad \left| : \frac{p_x}{L} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho_x K_x^2 p_x}{\mu_x^2 L^2} \frac{\partial \varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{v}}}{\partial \hat{t}} + \frac{\rho_x K_x^2 p_x}{\mu_x^2 L^2} \hat{\nabla} \cdot (\varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{v}}^2) \\ = -\varphi \hat{\nabla} \cdot \hat{\rho} + \frac{\rho_x g_x L}{p_x} \varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{g}} - \varphi \frac{\hat{\mu}}{\hat{K}} \hat{\mathbf{v}} + \frac{K_x}{L^2} \varphi \hat{\mu} \hat{\Delta} \hat{\mathbf{v}} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{Eu} \frac{\partial \varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{v}}}{\partial \hat{t}} + \frac{1}{Eu} \hat{\nabla} \cdot (\varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{v}}^2) = -\varphi \hat{\nabla} \cdot \hat{\rho} + \frac{1}{S} \varphi \hat{\rho} \hat{\mathbf{g}} - \varphi \frac{\hat{\mu}}{\hat{K}} \hat{\mathbf{v}} + \mathbf{Dar} \varphi \hat{\mu} \hat{\Delta} \hat{\mathbf{v}}$$

Получили следующие безразмерные параметры:

$$Eu = \frac{p_x}{\rho_x v_x^2} = \frac{\mu_x^2 L^2}{\rho_x K_x^2 p_x} \quad - \quad \text{число Эйлера, безразмерный параметр}$$

характеризующий отношение между силами давления на единичный объём жидкости (или газа) и инерционными силами

$$S = \frac{p_x}{\rho_x g_x L} \quad - \quad \text{новый безразмерный параметр, характеризующий отношение}$$

между силами давления гравитационной силой. В случае, когда внешний перепад давления велик по сравнению с силами гравитации (например нефтедобыча или эксперименты с некомским песчаником) параметр $1/S \ll 1$ и данным членом уравнения можно пренебречь. В случае, когда течение происходит за счёт капиллярного давления в условиях и при этом $1/S \sim 1$, пренебрегать данным членом уравнения уже нельзя.

$Dar = \frac{K_x}{L^2}$ – число Дарси, отношение проницаемости к площади поперечного сечения. Для задач, рассматриваемых в этой работе, $K_x \approx 10^{-8}$ или менее, характерный размер при этом порядка метра, таким образом $Dar \ll 1$. Поэтому для всех задач данной работы последним членом уравнения баланса импульса будем пренебрегать.

Следует обратить внимание на то, что в случае, когда $1/S \ll 1$, $Dar \ll 1$ и $1/Eu \ll 1$ закон сохранения импульса имеет вид классического закона Дарси:

$$\frac{\hat{\mu}}{\hat{K}} \hat{v} = -\nabla \cdot \hat{p}$$

III. Обезразмеривание уравнения баланса энергии для скелета

$$\frac{\partial(1 - \varphi)\rho_s E_s(T_s)}{\partial t} = -\nabla q_s(T_s) - \Delta Q(T, T_s)$$

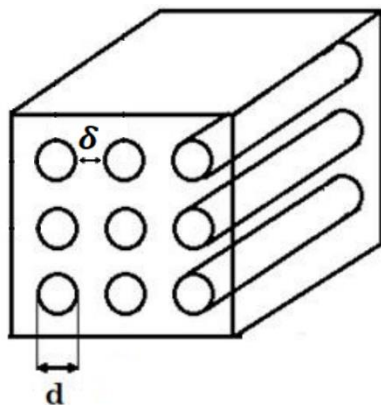
$$E_s = c_s T_s + const$$

$$\nabla q_s(T_s) = (1 - \varphi)\nabla(\lambda_s \nabla T_s)$$

Оценим обмен теплом между флюидом и скелетом $\Delta Q(T, T_s)$:

$$\Delta Q(T, T_s) = \frac{q S_{\text{пов}}}{V}$$

Рассмотрим капиллярную модель пористой среды:



$$q = \lambda \nabla T \approx \frac{\lambda}{\delta} (T - T_s)$$

$$\Delta Q(T, T_s) = \frac{\lambda S_{\text{пов}}}{\delta V} (T - T_s)$$

$$\frac{\rho_x T_{s_x} K_x p_x c_s}{\mu_x L^2} \frac{\partial(1 - \varphi) \hat{\rho}_s \hat{T}_s}{\partial \hat{t}} = - \frac{\lambda_s T_{s_x}}{L^2} \hat{\nabla} \left((1 - \varphi) \hat{\nabla} \hat{T}_s \right) - T_{s_x} \frac{\lambda_s S_{\text{пов}}}{\delta V} \left(\frac{T_x}{T_{s_x}} \hat{T} - \hat{T}_s \right) \quad \left| : \frac{\lambda_s T_{s_x}}{L^2} \right.$$

$$\frac{\rho_x L^2 K_x p_x c_s}{\mu_x L^2 \lambda_s} \frac{\partial(1 - \varphi) \hat{\rho}_s \hat{T}_s}{\partial \hat{t}} = - \hat{\nabla} \left((1 - \varphi) \hat{\nabla} \hat{T}_s \right) - \frac{L^2 K_x S_{\text{пов}}}{K_x \delta V} \left(\frac{T_x}{T_{s_x}} \hat{T} - \hat{T}_s \right)$$

$$\frac{L^2 \mu_x c_s \rho_x K_x^2 p_x}{K_x \lambda_s \mu_x^2 L^2} \frac{\partial(1 - \varphi) \hat{\rho}_s \hat{T}_s}{\partial \hat{t}} = - \hat{\nabla} \left((1 - \varphi) \hat{\nabla} \hat{T}_s \right) - \frac{L^2 K_x S_{\text{пов}}}{K_x \delta V} \left(\frac{T_x}{T_{s_x}} \hat{T} - \hat{T}_s \right)$$

$$\frac{\mathbf{Pr}}{\mathbf{EuDar}} \frac{\partial(1 - \varphi) \hat{\rho}_s \hat{T}_s}{\partial \hat{t}} = - \hat{\nabla} \left((1 - \varphi) \hat{\nabla} \hat{T}_s \right) - \frac{1}{\mathbf{Dar}} \mathbf{Ni} \left(\frac{T_x}{T_{s_x}} \hat{T} - \hat{T}_s \right)$$

Здесь $\mathbf{Pr} = \frac{\mu_x c_s}{\lambda_s}$ – аналог числа Прандтля, характеризующий соотношение между работой сил вязкости в жидкости и теплом, переносимым в твердом теле посредством теплопроводности.

Как правило, характерные температуры совпадают: $\frac{T_x}{T_{s_x}} = 1$

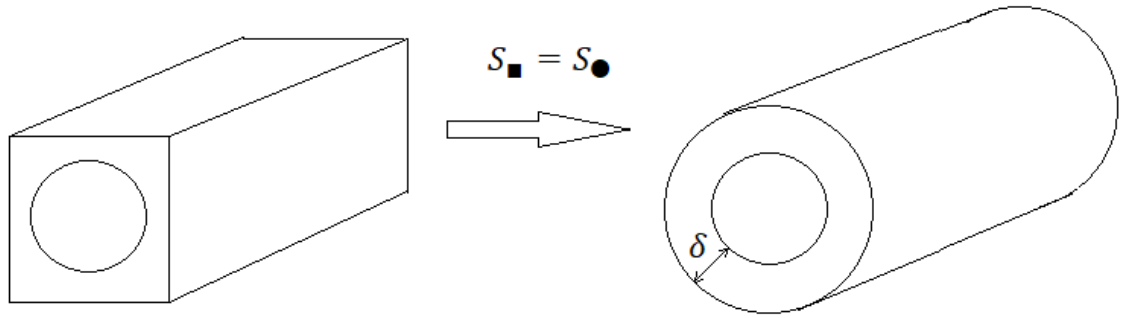
$\mathbf{Ni} = \frac{S_{\text{пов}} K_x}{\delta V}$ – новый безразмерный параметр, характеризующий структуру пористой среды. Оценим параметр Ni, для этого установим связь геометрических характеристик среды.

Для капиллярной модели пористой среды:

$$\varphi = \frac{V_{\text{пор}}}{V} = (\text{гипотеза Рахматуллина}) = \frac{S_{\text{пор}}}{S} = \frac{n \pi d^2}{4 S_{\text{сеч}}} \Rightarrow n = \frac{4 \varphi S_{\text{сеч}}}{\pi d^2}$$

$$\frac{S_{\text{пов}}}{V} = \frac{n \pi d l}{S_{\text{сеч}} l} = \frac{4 \varphi}{d}$$

Для оценки δ рассмотрим другую модель поры:



$$\varphi = \frac{4\pi d^2}{4\pi(d + 2\delta)^2}$$

$$\sqrt{\varphi} = \frac{d}{d + 2\delta} \Rightarrow d = 2\delta \frac{\sqrt{\varphi}}{1 - \sqrt{\varphi}}$$

Таким образом, получили связь между d , δ и φ .

$$\mathbf{Ni} = \frac{S_{\text{пов}} K_x}{\delta V} \approx \frac{K_x}{\delta} \frac{4\varphi}{d}$$

$$\delta = \frac{1 - \sqrt{\varphi}}{2\sqrt{\varphi}} d$$

$$\mathbf{Ni} \approx \frac{K_x}{d^2} \frac{4\varphi 2\sqrt{\varphi}}{(1 - \sqrt{\varphi})} = \frac{K_x L^2}{L^2 d^2} \frac{8\varphi\sqrt{\varphi}}{(1 - \sqrt{\varphi})} = \mathbf{Dar} \frac{L^2}{d^2} \frac{8\varphi\sqrt{\varphi}}{(1 - \sqrt{\varphi})}$$

Где $\mathbf{Dar} \ll 1, \frac{L^2}{d^2} \gg 1$, поэтому для в каждом конкретном случае требуются оценивание этого параметра.

Оценим зависимость проницаемости от диаметра поры. Преобразуем член с сопротивлением скелета:

$$\varphi \frac{\mu}{K} v = F_{\text{сопр}} = \frac{\tau_w S_{\text{пов}}}{V} = \frac{\tau_w \pi d l n}{S_{\text{сеч}} l} = \frac{\tau_w \pi d n}{S_{\text{сеч}}} \frac{4\pi d^2}{4\pi d^2} = \varphi \frac{4\tau_w}{d}$$

$$\tau_w = \frac{8\mu v}{d/2} = \frac{16\mu v}{d} \text{ (течение Пуазейля)}$$

$$\varphi \frac{\mu}{K} v = \varphi \frac{4\tau_w}{d} = \frac{64\mu v}{d^2}$$

$$K \approx \frac{d^2}{64}$$

$$K = \beta d^2 \quad \beta \lesssim 0.01$$

Для капиллярной модели пористой среды K и d^2 связаны через параметр β , для произвольной пористой среды эту связь характеризует новый безразмерный параметр Ni .

Обезразмеривание уравнения баланса энергии для флюида

$$\frac{\partial \varphi \rho c_V T}{\partial t} + \nabla(\varphi \rho v c_V T) = -\nabla q(T) + \Delta Q(T, T_s) + \varphi \Delta Q_r(\dot{\omega})$$

$$\nabla q(T) = \varphi \nabla(\lambda \nabla T)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho_x c_V T_x}{t_x} \frac{\partial \varphi \hat{\rho} \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \frac{\rho_x c_V T_x v_x}{L} \hat{\nabla}(\hat{\rho} \hat{v} c_V \hat{T}) \\ = -\frac{\lambda_x T_x}{L^2} \hat{\nabla} \varphi \hat{\lambda} \hat{\nabla} \hat{T} + \frac{\lambda_s S_{\text{пов}}}{\delta} \frac{T_x}{V} \left(\hat{T} - \frac{T_{s_x}}{T_x} \hat{T}_s \right) \\ + \frac{\Delta H \rho_x}{t_{\text{хим}}} \Delta \hat{Q}_r(\dot{\omega}) \varphi \quad \Big| : \frac{\rho_x c_V T_x}{t_x} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi \hat{\rho} \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \hat{\nabla}(\hat{\rho} \hat{v} c_V \hat{T}) \\ = -\frac{\lambda_x t_x}{\rho_x c_V L^2} \hat{\nabla} \varphi \hat{\lambda} \hat{\nabla} \hat{T} + \frac{\lambda_s S_{\text{пов}}}{\delta} \frac{t_x}{V} \frac{1}{\rho_x c_V} \left(\hat{T} - \frac{T_{s_x}}{T_x} \hat{T}_s \right) \\ + \frac{\Delta H}{c_V T_x} \frac{t_x}{t_{\text{хим}}} \varphi \Delta \hat{Q}_r(\dot{\omega}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi \hat{\rho} \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \hat{\nabla}(\hat{\rho} \hat{v} c_V \hat{T}) \\ = -\frac{\lambda_x \mu_x}{\rho_x c_V K_x p_x} \frac{\mu_x K_x L^2}{\mu_x K_x L^2} \hat{\nabla} \varphi \hat{\lambda} \hat{\nabla} \hat{T} + \frac{\lambda_s S_{\text{пов}}}{\delta} \frac{1}{V} \frac{\mu_x L^2}{K_x p_x \rho_x c_V} \frac{\mu_x K_x}{\mu_x K_x} \left(\hat{T} - \frac{T_{s_x}}{T_x} \hat{T}_s \right) \\ + \mathbf{Zv Dam} \varphi \Delta \hat{Q}_r(\dot{\omega}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi \hat{\rho} \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \hat{\nabla}(\hat{\rho} \hat{v} c_V \hat{T}) \\ = -\frac{\lambda_x}{\mu_x c_V} \frac{K_x}{L^2} \frac{\mu_x^2 L^2}{\rho_x K_x^2 p_x} \hat{\nabla} \varphi \hat{\lambda} \hat{\nabla} \hat{T} + \frac{\lambda_s S_{\text{пов}} K_x}{\mu_x c_V \delta V} \frac{\mu_x^2 L^2}{K_x^2 p_x \rho_x} \left(\hat{T} - \frac{T_{s_x}}{T_x} \hat{T}_s \right) \\ + \mathbf{Zv Dam} \varphi \Delta \hat{Q}_r(\dot{\omega}) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \varphi \hat{\rho} \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \hat{\nabla}(\hat{\rho} \hat{v} c_v \hat{T})$$

$$= - \frac{\mathbf{Dar Eu}}{\mathbf{Pr}} \hat{\nabla} \varphi \hat{\lambda} \hat{\nabla} \hat{T} + \frac{\mathbf{Ni Eu}}{\mathbf{Pr}} \left(\hat{T} - \frac{T_{sx}}{T_x} \hat{T}_s \right) + \mathbf{Zv Dam} \varphi \Delta \widehat{Q}_r(\dot{\omega})$$

Здесь

$\mathbf{Zv} = \frac{\Delta H}{c_v T_x}$ – число Зверева, отношение удельной химической энергии к удельной тепловой энергии

$\mathbf{Dam} = \frac{t_x}{t_{\text{хим}}}$ – число Дамкёлера, отношение характерного времени физического процесса к характерному времени химической реакции

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

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. — 2022 — DOI:10.1615/HeatTransRes.2022044787
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 — стр. 80-93
(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)
3. Smirnova M.N., Nikitin V.F., Skryleva E.I., Weisman Yu. G. Capillary driven fluid flows in microgravity // Acta Astronautica. — 2022 — DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.10.037
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
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 — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.12.009
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 — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.06.054
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 — стр. 629-639 — DOI: 10.1007/s12217-019-09733-7
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

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

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

11. Skryleva E.I., Nikitin V.F., Dushin V.R. Microgravity investigation of seepage flows in porous media // сборник First IAA/AAS SciTech Forum on SPACE FLIGHT MECHANICS AND SPACE STRUCTURES AND MATERIALS — том 170 — стр. 729-739

12. 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

13. Скрылева Е.И., Козлов И.В. Математическое моделирование и обработка эксперимента по вытеснению нефти водой из неокосских песчаников // Вестник кибернетики — 2016 — № 2 — стр. 138-145

14. 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

15. 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

16. Душин В.Р., Никитин В.Ф., Скрылева Е.И. Вычислительное моделирование вытеснения флюида из пористой среды // Вестник кибернетики — 2017 — № 28
17. 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
18. 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
19. 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
20. 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
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

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.
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
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.
25. Бетелин В.Б., Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Стамов Л.И., Михальченко Е.В., Тюренкова В.В., Скрылева Е.И. м Способ многомасштабного моделирования нелинейных процессов подземной гидродинамики // Патент №2670174 — 18 октября 2018
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
28. Логвинов О.А., Скрылева Е.И. Вытеснение вязкой жидкости из кольцеобразной ячейки Хеле-Шоу со стоком // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. — 2016 — № 4 — с. 39-43

29. Logvinov O.A., Skryleva E.I. Displacement of a viscous fluid from a Hele-Shaw cell with a sink // *Moscow University Mathematics Bulletin*. — 2016 — том 77 — № 4 — с. 77-81
30. Бетелин В.Б., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н., Михальченко Е.В., Скрылева Е.И., Стамов Л.И., Тюренкова В.В. Компьютерный керносимулятор – подходы и методы // *Вестник кибернетики* — 2015 — № 4 — с. 33-44
31. Бетелин В.Б., Смирнов Н.Н., Стамов Л.И., Скрылева Е.И. Восстановление структуры порового пространства на основании обработки данных томографии // *Вестник кибернетики* — 2018 — том 30 — № 2 — с. 87-92
32. Варга Р. Функциональный анализ и теория аппроксимации в численном анализе // М.: Мир – 1974
33. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов // М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований – 2003 – 128 с.
34. Самарский А.А. Теория разностных схем // М.: Наука – 1976 – 335 с.
35. Aziz K. Notes for Petroleum Reservoir Simulation // Stanford, California: Stanford Univ. – 1994 – p. 471
36. Batycky, R.P. A Three-Dimensional Two-Phase Field Scale Streamline Simulator. PhD Thesis // Stanford, California: Stanford University – 1997
37. Batycky R.P., Blunt M. J., Thiele M. R. A 3D Field Scale Streamline Based Reservoir Simulator // *SPE Reservoir Engineering*, November –1997 – pp. 246 – 254
38. Кадет В.В. Методы теории перколяции в подземной гидромеханике // М.: ЦентрЛитНефтеГаз – 2008 – 96 с.
39. Rapoport, L.A. and W.J. Leas. Properties of Linear Waterfloods // *Trans AIME* – 1953 – pp. 139-148
40. Leverett, M.C., Flow of Oil-Water Mixtures through Unconsolidated Sands // *Trans. AIME*. – 1939 – pp. 381-401

41. Leverett M.C. Capillary Behavior in Porous Solids // Trans. AIME – 1941 – v. 142 – pp. 152–169
42. Jörg Klätte, Michael Dreyer, Mark Weislogel, A fast numerical procedure for steady capillary flow in open channels // Acta Mechanica – 2008
43. Diana Gaulke, Michael E. Dreyer, CFD Simulation of Capillary Transport of Liquid Between Parallel Perforated Plates using Flow3D // Microgravity Sci. Technol. – 2015 – v. 27 – p. 261-271
44. Aleksander Grah, Michael Dreyer, Dynamic stability analysis for capillary channel flow: One-dimensional and three-dimensional computations and the equivalent steady state technique // Physics of Fluids – 2010
45. Aldushin A.P., Matkowsky B.J. Instabilities, Fingering and the Saffman - Taylor Problem in Filtration Combustion // Combust. Sci. and Tech. – 1998 - v. 133 – pp. 293-341
46. Chapman S.J., King J. R. The selection of Saffman -Taylor fingers by kinetic undercooling // Journal of Engineering Mathematics –2003 – v.46 – No 1 – pp. 1-32
47. Babkin V.S., Korzhavin A.A., Bunev V.A. Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media // Combustion and Flame – 1995 – v. 101 – No 2 – pp. 239-251
48. Bunev V.A., Babkin V.S. Numerical characteristics of the low-temperature oxidation of dimethylether with air // Mendeleev Commun – 2012 – v.22 – pp. 238-239
49. Ф. С. Палесский, Р. В. Фурсенко, С. С. Минаев, Моделирование фильтрационного горения газов в цилиндрической пористой горелке с учетом радиационного теплообмена // Физика горения и взрыва – 2014 – т. 50 – No 6 – с. 3-10
50. M. Abdul Mujeebu, M.Z. Abdullah, M.Z. Abu Bakar, A.A. Mohamad, R.M.N. Muhad, M.K. Abdullah // Combustion in porous media and its applications – A comprehensive survey, Journal of Environmental Management – 2009 – v.90 – 2287–2312

51. M. Abdul Mujeebu, M. Zulkifly Abdullah, A.A. Mohamad, M.Z. Abu Bakar, Trends in modeling of porous media combustion // Progress in Energy and Combustion Science – 2010 – v.36 – 627-650
52. С.Г. Вольпин, Н.Н. Смирнов, М.Н. Кравченко, Н.Н. Диева. Моделирование импульсно-волновой обработки нефтяных пластов методом термогазохимического воздействия. // Сборник научных трудов ОАО «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт им. акад. А.П. Крылова». – 2013. – Вып. 149. – с.127-137
53. С.Г. Вольпин, А.Р. Саитгареев, Н.Н. Смирнов, М.Н. Кравченко, Д.А. Корнаева, Н.Н. Диева. Перспективы применения волновой технологии термогазохимического воздействия для повышения нефтеотдачи пластов. // Нефтяное хозяйство. – 2014. - №1 – с.62-66
54. Kravchenko M.N., Dieva N.N., Lishchuk A.N., Muradov A.V., Vershinin V.E. Hydrodynamic modeling of thermochemical treatment of low permeable kerogen-containing reservoirs. Georesursy = Georesources – 2018 – 20(3), Part 1 – pp. 178-185
55. Darcy, H. The public fountains of the city of Dijon. Experience and application // Paris – 1856
56. Schilthuis, R.J.: Active Oil and Reservoir Energy.// Trans.: AIME – 1936
57. Л.С. Лейбензон. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде // ОГИЗ Государственное Издательство технико-теоретической литературы – 1947
58. Wyckoff R. D., Botset H. F. The flow gas liquid mixtures through unconsolidated sands // Physics. – 1936 – v. 7 – No 9 – pp. 3-25
59. Данилов В.Л., Кац Р.М. Гидродинамические расчеты взаимного вытеснения жидкостей в пористой среде // М.: Недра, – 1979. – 264 с.
60. Buckley S.E. and Leverett M.S. Mechanism of Fluid Displacement in Sands. // Journ. Petr. Technology – 1941 – pp. 13-37
61. Welge H.J. A Simplified Method for Computing Oil Recovery by Gas or Water Drive. // Trans. AIME – 1952 – v. 195 – pp. 91-98

62. Дмитриев М.Н. Модель двухфазной фильтрации Рапопорта-Лиса в анизотропных средах. //Изв.РАН. Механика жидкости и газа. – 2011 – № 2 – с. 136-144
63. Дмитриев М.Н., Дмитриев Н.М., Максимов В.М., Семигласов Д.Ю. Эффекты анизотропии при двухфазных фильтрационных течениях.// Изв.РАН. Механика жидкости и газа – 2010 – № 3 – с. 140-146
64. Максимов В.М., Дмитриев М.Н., Антонец Ю.С. Эффекты тензорного характера относительных фазовых проницаемостей при взаимном вытеснении газа водой в анизотропных пластах.// Газовая промышленность. – 2009 – № 12 – с. 10-12
65. Дмитриев М.Н., Дмитриев Н.М., Кадет В.В. Обобщённый закон Дарси и структура фазовых и относительных фазовых проницаемостей для двухфазной фильтрации в анизотропных пористых средах. // Изв.РАН. Механика жидкости и газа. – 2003 – № 2. – с. 136-145
66. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах // М., Недра – 1984
67. М.М. Хасанов, Г.Т. Булгакова. Нелинейные и неравновесные эффекты в реологически сложных средах // Издательство Института Компьютерных Исследований, Москва – Ижевск – 2003
68. Баренблатт Г. И., Винниченко А. П. Неравновесная фильтрация несмешивающихся жидкостей.// Успехи механики – 1980 – №3 – с. 35-50
69. Баренблатт Г.И. Фильтрация двух несмешивающихся жидкостей в однородной пористой среде. // Изв. АН СССР, сер. Механика жидкости и газа, – 1971 – № 5 – с. 17—26.
70. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа // М.: Недра, – 1972.
71. Sorbie K.S., Zhang H.R., N.B. Tsibuklis. Linear viscous fingering: new experimental results, direct simulation and the evaluation of averaged models // Chemical Engineering Science – 1995 – v. 50 – No. 4 – pp. 601-616

72. Meiburg, E., Homsy, G.M. Nonlinear unstable viscous fingers in Hele-Shaw flows. II. Numerical simulation // *Phys. Fluids* – 1988 – 31(3).
73. Tanveer, S. Surprises in viscous fingering – *Fluid Mech.* – 2000 – v. 409 – p. 273
74. De Wit A., Homsy G.M. Viscous fingering in periodically heterogeneous porous media. Part II. Numerical simulations // *Chem. Phys* – 1997 – v. 107(22) – 9619
75. Nield D.A., Bejan A. *Convection in porous media* // Springer-Verlag – New York / Berlin / Heidelberg / London – 1992.
76. Guan X., Pitchumani R. Viscous fingering in a Hele-Shaw cell with finite viscosity ratio and interfacial tension // *ASME Journal of Fluids Engineering* – 2003 – v. 125 – No. 2 – pp. 354-364
77. Dushin V.R., Smirnov N.N., Legros J.C., Istasse E., Bosseret N., Mincke J.C., Goodman S. Multiphase flow in porous media – mathematical model and microgravity experiments // *Microgravity Science and Technology* – 1996 – IX(3) – pp. 222-231.
78. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Norkin A.V., Kiselev A.B., Legros J.C., Istasse E. Microgravity investigation of capillary forces in porous media // *Space Forum* – 2000 – 6(1-4) – pp. 1-10.
79. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Ivashnyov O.E., Legros J.C., Vedernikov A., Scheid B., Istasse E. Instability in viscous fluids displacement from cracks and porous samples // *Proc. 53-d IAF Congress, Houston* – 2002 – IAC-02-J.2.02. – 11p.
80. Vedernikov A., Scheid B., Istasse E., Legros J.C. Viscous fingering in miscible liquids under microgravity conditions // *Physics of Fluids* – 2001 – v. 13, No 9, p. S12
81. Nikitin V.F., Smirnov N.N., Legros J.C. Effect of fingering in porous media // *52d IAF Congress. Toulouse* – 2001 – IAF-01-J.4.10.
82. Brock D.C., Orr F.M. Flow visualization of viscous fingering in heterogeneous porous media // *SPE* – 1991 – 22614
83. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Ivashnyov O.E., Maximenko A., Thiercelin M., Vedernikov A., Scheid B., Legros J.C. Microgravity investigations of instability and

mixing flux in frontal displacement of fluids // Microgravity sci. technol – 2004 – XV/3 – pp. 3-28.

84. Tardy Ph. Viscous fingering in porous media. Towards 1D averaged models for fracture cleanup simulation // Proc. Moscow SMR Workshop – 2003 – paper no. 403

85. И.А. Санина, С.Б. Турунтаев, Э.М. Горбунова, Н.А. Барышников, Е.В. Зенченко, М.А. Нестеркина, Н.Л. Константиновская, Развитие методов выявления пространственно-временных вариаций фильтрационных свойств коллекторов месторождений углеводородов по данным микросейсмического мониторинга // Георесурсы – 2014 – №. 1 – р. 8-20

86. Барышников Н.А., Беляков Г.В., Турунтаев С.Б. Экспериментальное исследование вытеснения вязких жидкостей из пористых сред.// Изв. РАН. МЖГ. – 2005 г. № 1. – с.115-122

87. Барышников Н.А., Турунтаев С.Б., Беляков Г.В., Таирова А.А., Виноградов Е.А. Экспериментальное изучение неустойчивых двухфазных течений// Сборник научных трудов ИДГ РАН "Динамические процессы в геосферах", Москва, «Геос», – 2013 г., Вып.4, – с.164-174

88. Bruce W.A.: An electrical device for analyzing oil reservoir behavior.// Trans.: AIME, – 1943

89. Кричлоу, Г.Б. Современная разработка нефтяных месторождений – проблемы моделирования / Б. Кричлоу; пер. с англ. Я. И. Тетельбаума. // М.: Недра, – 1979. – 303 с

90. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. // М.: Гостоптехиздат, – 1949

91. Lee. B.D. Potentiometric model studies of fluid flow on petroleum reservoirs. //Trans.: AIME, – 1946. – p. 174

92. Afanasyev A., On the Numerical Modeling of Water Flows in Porous Media under Near-Critical Conditions // Fluid Dynamics – 2020 – том 55 – № 8 – с. 1003-1011

93. Afanas'ev A.A., Mel'nik O.E, Mathematical modeling of multiphase seepage under near-critical conditions, // Moscow University Mechanics Bulletin – 2013 – том 68 – № 3 – с. 76-79
94. Афанасьев А.А., Мельник О.Э., О математическом моделировании многофазной фильтрации при околокритических условиях // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика – 2013 – том 68 – с. 68-72
95. Tongjun Miao, Boming Yu, Yonggang Duan, Quantang Fang, A fractal model for spherical seepage in porous media // International Communications in Heat and Mass Transfer – 2014 – Volume 58 – Pages 71-78.
96. Tongjun Miao, Zhangcai Long, Aimin Chen, Boming Yu. Analysis of permeabilities for slug flow in fractal porous media // International Communications in Heat and Mass Transfer – 2017 – Volume 88 – Pages 194-202.
97. Meijuan Yun, Boming Yu, Jianchao Cai, Analysis of seepage characters in fractal porous media // International Journal of Heat and Mass Transfer – 2009 – Volume 52 – Issues 13–14
98. Xu Yang, Yingjie Liang, Wen Chen. A spatial fractional seepage model for the flow of non-Newtonian fluid in fractal porous medium // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation – 2018 – Volume 65 – Pages 70-78
99. G.I. Barenblatt, V.M. Entov, V.M. Ryzhik, Theory of Fluids Flows through Natural Rocks // Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London – 1990
100. Bear, J., Bachmat, Y., Introduction to Modelling of Transport Phenomena in Porous Media // Kluwer Academic Publishers-Dordrecht, Boston, London – 1990
101. Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media // Dover Publications Inc., New York – 1988
102. Kaviany, M.: Principles of Heat Transfer in Porous Media. Second Ed. // Springer-Verlag, New York – 1995.
103. Nigmatilin, R. I.: Dynamics of Multiphase Media // Moscow Science Publication – 1987

104. Saffman, P.G., Taylor, G.J. The penetration of a fluid into a porous medium of Hele-Shaw cell containing a more viscous fluid // Proc. R. Soc. Lond. – 1958 – A 245,312
105. N.N. Smirnov, V.F.Nikitin, V.R.Dushin, Yu.G.Philippov, V.A.Nerchenko, Three-dimensional convection and unstable displacement of viscous fluids from strongly encumbered space // Acta Astronautica – 2010 – v.66 – p. 844 – 863.
106. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Maximenko A., Thiercelin M., Legros J.C. Instability and mixing flux in frontal displacement of viscous fluids from porous media // Physics of Fluids – 2005 – v.17 – 084102.
107. Osiptsov A.A., Boronin S.A., Zilonova E.M., Desroches J., Managed Saffman-Taylor instability during overflush in hydraulic fracturing // Journal of Petroleum Science and Engineering – 2018 – том 162 – с. 513-523
108. Афанасьев А.А., Султанова Т.В., Исследование гидродинамической неустойчивости фронта вытеснения при закачке углекислого газа в водонасыщенный пласт // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа – 2016 – № 4 – с. 85-96
109. *Istasse E.* Determination of capillary characteristics in porous media // Brussels – 2001
- 110.Smirnov, N. Dushin, V., Nikitin, V., Philippov, Y., Two phase flows in porous media under microgravity conditions // Microgravity Science and Technology – 2008 – v. 20 (3-4) – pp. 155-160
- 111.Smirnov, N. N., Nikitin, V. F., Norkin, A. V., Kudryavtseva, O. V., Legros, J.C., Istasse, E., Shevtsova, V., Capillary Driven Filtration in Porous Media // Microgravity - Science and Technology – 1999 – Hanser Publ., Munich, Germany – v. XII/1 – pp. 23-35
- 112.Smirnov, N. N., Legros, J. C. Nikitin, V. F., Istasse, E., Schramm, L., Wassmuth, F., D'Arcy Hart, Filtration in Artificial Porous Media and Natural Sands under Microgravity Conditions // Microgravity - Science and Technology – 2003 – Z-Tec Publishing, Bremen, Germany – v. XIV/2 – pp 3-28

113. Yibin Huang, Yanjun Zhang, Ziwang Yu, Yueqiang Ma, Chi Zhang, Experimental investigation of seepage and heat transfer in rough fractures for enhanced geothermal systems // *Renewable Energy* – 2019 – v. 135 – pp. 846-855
114. Dongxing DU, Dexi WANG, Ninghong JIA, Weifeng LYU, Jishun QIN, Chengcheng WANG, Shengbin SUN, Yingge LI, Experiments on CO₂ foam seepage characteristics in porous media // *Petroleum Exploration and Development* – 2016 – v. 43 – Issue 3 – pp. 499-505
115. Junhua Wu, Haishan Li, Fuchang Wang, Experimental study of seawater seepage and heat transfer in a laboratory vertical beach well // *Applied Thermal Engineering* – 2018 – v. 129 – pp. 403-409
116. Smirnov, NN, Legros, JC Nikitin, VF, Istasse, E., Schramm, L., Wassmuth, F., D'Arcy Hart, Filtration in Artificial Porous Media and Natural Sands under Microgravity Conditions // *Microgravity - Science and Technology*. Z-Tec Publishing, Bremen, Germany – 2003 – v. XIV / 2 – pp. 3-28
117. Smirnov, N. N., Nikitin, V. F., Norkin, A. V., Kudryavtseva, O. V., Legros, J. C., Istasse, E., Shevtsova, V. M., Capillary Driven Filtration in Porous Media // *Microgravity - Science and Technology*. Hanser Publ., Munich, Germany – 1999 – v. XII / 1 – pp. 23-35
118. S. van Mourik, A.E.P. Veldman and M.E. Dreyer, Simulation of Capillary Flow with a Dynamic Contact Angle // *Microgravity sci. technol* – 2002 – XVII-3 – pp. 87-93
119. Billingham J., Nonlinear sloshing in zero gravity // *Fluid Mech* – 2002 – v. 464 – pp. 365-39
120. Ching-Yao Chen, C.-W. Huang, L.-C. Wang, Controlling radial fingering patterns in miscible confined flows // *PHYSICAL REVIEW E* 82 – 2010 – 056308
121. Eduardo O. Dias, Jos'e A. Miranda, Influence of inertia on viscous fingering patterns: Rectangular and radial flows // *PHYSICAL REVIEW E* 83 – 2011 – 066312
122. Luciano dos Reis, Jos'e A. Miranda, Controlling fingering instabilities in nonflat Hele-Shaw geometries // *PHYSICAL REVIEW E* 84 – 2011 – 066313

123. Grah, A., Canfield, P.J., Bronowicki, P.M., Dreyer, M.E., Chen, Y., Weislogel, M.M., Transient capillary channel flow stability // *Microgravity Sci. Technol* – 2014 – 26.6 – pp. 385–396
124. Canfield, PJ, Bronowicki, PM, Chen, Y., Kiewidt, L., Grah, A., Klatte, J., Jenson, R., Blackmore, W., Weislogel, MM, Dreyer, ME, The capillary channel flow experiments on the international space station: experiment set-up and first results // *Exp. Fluids* – 2013 – 54.1519 – pp. 1-14
125. Bronowicki, P., Canfield, P., Grah, A., Dreyer, M.E. : Free surfaces in open capillary channels - parallel plates // *Phys. Fluids* – 2015 – 27.012106 – pp. 1–21
126. Kamal S. Bisht, Michael E. Dreyer, Phase Separation in Porous Media Integrated Capillary Channels // *Microgravity Science and Technology* – 2020 – 32 – 1001-1018
127. Chernova A.A., Afanasyev A.A. Influence of the Gravity Override on the Optimal Gas Flooding Strategies *Fluid Dynamics* – 2022 – том 57 – № 5 – с. 596-606
128. Чернова А.А., Афанасьев А.А., Влияние гравитационного расслоения фаз на оптимальные режимы водогазового воздействия на нефтяные пласты // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа* – 2022 – № 5 – с. 51-61
129. Н.А. Барышников, С.Б. Турунтаев, С.В. Елисеев. Фильтрация вязкой жидкости в пористой среде, сопровождаемая фазовым переходом. Динамические процессы в геосферах // *сборник научных трудов ИДГ РАН* – 2015 – No. 7 –pp. 38-43
130. Baryshnikov, N.A., Turuntaev, S.B., Eliseev, S.V. Filtration of viscous fluid in a porous medium with a phase transition // *Petroleum Chemistry* – 2016 – v. 5 – No. 56 – p. 436-439
131. Perkins T.K., Kern L.R. Widths of hydraulic fractures // *J. Petrol. Technol.*, Paper SPE 89 – 1961 – v. 222 – pp. 937-949
132. Nordgren R. Propagation of vertical hydraulic fractures // *J. Petrol. Technol* – 1972 – v. 253 – pp. 306-314

133. Khristianovich S.A., Zeltov Y.P., Formation of vertical fractures by means of highly viscous liquid // Proc. Fourth World Petrol. Congress, Rome – 1955 – v. 2. pp. 579 – 586
134. Lister J.R. Buoyancy-driven fluid fracture: the effects of material toughness and of low viscosity precursors // Fluid Mech – 1990 – v. 210 – pp. 263-280
135. Adachi J.I., Detournay E., Self-similar solution of a plane-strain fracture driven by a power-law fluid // Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech – 2002 – v.26. pp. 579-604
136. Gargash D. I., Evolution of a plane-strain fracture driven by a power-law fluid // Proceedings of ASCE Engineering Mechanics Conference. Washington – 2003
137. Ивашнев О.Е., Смирнов Н.Н. Формирование трещины гидроразрыва в пористой среде // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ – 2003 – No. 6 – с. 28-36
138. Hu J., Garagash D. I., Plane-strain fluid-driven fracture propagation in a permeable rock of finite toughness // Proceedings of ASCE Engineering Mechanics Conference , Delaware – 2004 – pp. 1-8
139. Smirnov N.N., Tagirova V.R., Problem of Propagation of a Gas Fracture in a Porous Medium // Fluid Dynamics – 2008 – v.43 – No.3 – pp. 402–417
140. Голубятников А.Н., Смирнов Н.Н., Тагирова В.Р., Об оптимальной форме полости для сбора вязкой жидкости, насыщающей грунт // Изв. РАН, МЖГ – 2008 – № 5 – с. 114-120
141. Aldushin A.P., Matkowsky B.J., Instabilities, Fingering and the Saffman - Taylor Problem in Filtration Combustion // Combust. Sci. and Tech. – 1998 - v. 133 – pp. 293-341
142. Chapman S.J., King J. R. The selection of Saffman-Taylor fingers by kinetic undercooling // Journal of Engineering Mathematics –2003 – v.46 – No. 1 – pp. 1-32
143. Babkin V.S., Korzhavin A.A., Bunev V.A. Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media // Combustion and Flame – 1995 – v.101 – No. 2 – pp. 239-251

144. Bunev V.A., Babkin V.S. Numerical characteristics of the low-temperature oxidation of dimethyl ether with air // *Mendeleev Commun* – 2012 – v.22 – pp. 238-239
145. Dushin V.R., Nikitin V.F., Phylippov Yu.G., Legros J.C., Two-component fluid convective flow in thin gaps // *Acta Astronautica* – 2010 – v.66 – pp. 742-747
146. Афанасьев А.А., Структура температурного фронта при фильтрации в трещиновато-пористой среде // *Прикладная математика и механика* – 2020 – том 84 – № 1 – с. 64-76
147. Afanasyev A.A., Effective Asymptotic Model of Two-Phase Flow through Fractured-Porous Media, в журнале *Fluid Dynamics* – 2019 – том 54 – № 5
148. Афанасьев А.А., Осредненная асимптотическая модель двухфазной фильтрации в трещиновато-пористых средах, *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа* – 2019 – № 5 – с. 83-92
149. Garagash I.A., Osiptsov A.A., Boronin S.A., Dynamics bridging of proppant particles in a hydraulic fracture // *International Journal of Engineering Science* – 2019 – том 135 – с. 86-101
150. Tolmacheva K.I., Boronin S.A., Osiptsov A.A., Formation damage and cleanup in the vicinity of flooding wells: Multi-fluid suspension flow model and calibration on lab data, // *Journal of Petroleum Science and Engineering* – 2019 – DOI 10.1016/j.petrol.2019.03.035
151. Боронин С.А., Осипцов А.А., Влияние миграции частиц на течение суспензии в трещине гидроразрыва // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа* – 2014 – № 2 – с. 80-94
152. Боронин С.А., Осипцов А.А., Толмачева К.И. Многоконтинуальная модель фильтрации суспензии в пористой среде в журнале // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа* – 2015 – № 6 – с. 50-62
153. Boronin S.A., Osiptsov A.A. Effects of particle migration on suspension flow in a hydraulic fracture // *Fluid Dynamics* – 2014 – том 49 – № 2 – с. 208-221

154. Tolmacheva K.I., Boronin S.A., Osiptsov A.A. Multi-fluid model for suspension filtration in porous media: effects of particle trapping and mobilization // WIT Transactions on Engineering Sciences – 2017 – № 115 – с. 153-159
155. Bing Bai, Dengyu Rao, Tao Chang, Zhiguang Guo. A nonlinear attachment-detachment model with adsorption hysteresis for suspension-colloidal transport in porous media // Journal of Hydrology – 2019 – Article 124080.
156. O.Yu. Melchaeva, S.B. Turuntaev, E.V. Zenchenko, Eremeeva E.I. Permeability change estimation from microseismic event activity variations // Proceedings of ECMOR XIII–13th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery – 2012 – pp.10-13
157. Щелкачев В.Н. Избранные труды // М.: Недра, – 1990.
158. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод // М.: Наука – 1977 – 664 с.
159. Пирвердян А. М. Физика и гидравлика нефтяного пласта // М., Недра, – 1982 – 192 с.
160. Баренблатт Г.И., Крылов А.П. Об упруго-пластическом режиме фильтрации. // Изв. АН СССР – 1955 – № 2 – с. 5–13
161. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика // М.: Недра – 1996 – 447 с.
162. Wyckoff R. D., Botset H. F. The flow gas liquid mixtures through unconsolidated sands // Physics – 1936 – v. 7 – No. 9 – p. 3-25
163. Данилов В.Л., Кац Р.М. Гидродинамические расчеты взаимного вытеснения жидкостей в пористой среде // М.: Недра – 1979 – 264 с.
164. Kanin E.A., Osiptsov A.A., Vainshtein A.L., Burnaev E.V. A predictive model for steady-state multiphase pipe flow: Machine learning on lab data // Journal of Petroleum Science and Engineering – 2019 – том 180 – с. 727-746
165. Kanin E., Vainshtein A., Osiptsov A., Burnaev E., The method of calculation the pressure gradient in multiphase flow in the pipe segment based on the machine learning algorithms // Journal of Physics: Conference Series – 2018 – том 193 – с. 012028

166. В.Б. Бетелин, А.А. Боксерман, В.Е. Костюков, В.А. Савельев, Проблемы управления процессами повышения нефтеотдачи на основе моделирования на супер-ЭВМ // НефтеГазоПромысловый инжиниринг – 2010 – 3 кв. – с.20-24
167. В.Б. Бетелин, А.Г. Кушниренко, Н.Н. Смирнов. Технологии супервычислений экзафлопного класса и обеспечение конкурентоспособности энергетики России // НефтеГазоПромысловый инжиниринг – 2011 – 3 кв. – с.10-13
168. Arribas, M., Elipe, A., and Palacios, M. Quaternions and the rotations of a rigid body // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* – 2006 – vol. 96 – pp. 239–251.
169. Скрылева Е. И., Никитин В. Ф., Смирнов Н. Н., Душин В. Р. Моделирование использования химического реагента для интенсификации просачивания нефти // Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», посвящённая дню рождения великого русского математика академика П. Л. Чебышёва : Труды конференции – стр. 122-132
170. 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
171. Скрылева Е. И., Никитин В. Ф., Смирнов Н. Н. Моделирование фильтрационных течений в пористых средах в условиях микрогравитации с учётом инерционных эффектов // Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», посвящённая дню рождения великого русского математика академика П. Л. Чебышёва : Труды конференции – стр. 132

172. Грант РФФИ № 20-07-00378 «Моделирование неустойчивого вытеснения жидкостей из пористых сред с учетом внешних воздействий, направленных на повышение нефтеотдачи» Душин В.Р., Логвинов О.А., Скрылева Е.И., Шамина А.А., <https://istina.msu.ru/projects/341406269/>
173. Проект «Модели многофазных сред и волновых процессов в природных, технических и социальных системах» Смирнов Н.Н., Стамов Л.И., Дьяков П.А., Захаров П.П., Зубков А.Ф., Ильюшина Е.А., Логвинов О.А., Малашин А.А., Маслов С.А., Михальченко Е.В., Никитин В.Ф., Рыбакин Б.П., Скрылева Е.И., Смирнова М.Н., Тюренкова В.В., Шамина А.А. // <https://istina.msu.ru/projects/323786154/>
174. Скрылева Е.И. Исследование фильтрационных течений в пористых средах в условиях микрогравитации // XII ВСЕРОССИЙСКИЙ СЪЕЗД ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ Сборник трудов — 2019 — том 2 — Стр. 1247-1249