



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Цыкунов Олег Игоревич

**Математическое моделирование капиллярной пропитки
и численные методы определения параметров модели на
основе экспериментальных данных для решения задач
нефтяного инжиниринга**

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: **Кузькин Виталий Андреевич**,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Смирнов Николай Николаевич**,
доктор физико-математических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой газовой и волновой динамики, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Давлетбаев Альфред Ядгарович,
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной физики, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится «___» _____ 2026 года в ____:00 на заседании диссертационного совета У.1.2.2.03 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 2 учебный корпус, аудитория _____)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
У.1.2.2.03,
кандидат технических наук



Н. И. Зайцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Новые вводимые в разработку нефтяные месторождения имеют низкую проницаемость, из-за чего капиллярные эффекты проявляются сильнее, чем в высокопроницаемых пластах. В таких нефтенасыщенных коллекторах на процесс вытеснения нефти оказывает большое влияние капиллярная пропитка – процесс самопроизвольной фильтрации смачивающей фазы из-за возникновения капиллярного давления. Существующие подходы к моделированию капиллярной пропитки эффективно применяются на макроуровне, но не подходят для микроуровня, так как не позволяют учесть неоднородность поровых каналов в горной породе, которая рассматривается как однородная среда с осредненными свойствами. Такие подходы применяются при моделировании разработки месторождений, но для циклических технологий при наличии перетоков между разными по размеру порами они не позволяют с высокой точностью воспроизвести процесс. Примером такой технологии является водный Huff and Puff – процесс циклической закачки воды в добывающую скважину с последующим отбором. Таким образом, создание подходов и математических моделей для описания капиллярной пропитки является актуальной задачей.

Модели капиллярной пропитки требуют большого количества исходных данных – свойств породы, которая является природной неоднородной пористой средой. Экспериментальные исследования капиллярной пропитки на низкопроницаемых образцах требуют значительных временных и финансовых затрат, из-за чего полный комплекс исследований проводится редко, а большая часть свойств не измеряется. Набор неизвестных параметров пористой среды можно определить с помощью алгоритмов оптимизации. Однако, для каждого типа многокритериальной задачи данные алгоритмы имеют различную эффективность. Поэтому создание специализированного эффективного алгоритма оптимизации и комплекса программ для определения неизвестных параметров пористой среды на основе ограниченного объема экспериментальных данных также является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Моделирование фильтрационных процессов и капиллярной пропитки в нефтенасыщенных коллекторах является одним из ключевых направлений в подземной гидромеханике. Данной задачей занималось множество отечественных и зарубежных исследователей. Основоположниками были П.С. Лаплас и Т. Юнг, описавшие явление капиллярности и формулу капиллярного давления при подъеме жидкости в тонкой трубке. Применительно к задачам фильтрации первые модели капиллярной пропитки созданы Д.С. Беллом и Ф.К. Кэмереном, Е.В. Вашбурном, среда рассматривалась как набор капиллярных трубок, использовалось уравнение фильтрации, введенное Г. Хагеном и Ж.Л. Пуазейлем. Другой подход использовал М. Леверетт, применив функцию Леверетта двухфазного

вытеснения для капиллярной пропитки. В последнее время большую популярность приобрели модификации моделей Е.В. Вашбурна и Ф.К. Кэмерона, разработанные Ж. Вангом и Д. Каем. В.Л. Барабановым создан подход для описания пропитки с использованием фрактального строения поровых каналов. Исследованиями противоточной пропитки занимались, в частности, И.Г. Телегин и О.Б. Бочаров. Большой вклад в изучение капиллярной пропитки также внесли работы Е.А. Богатыревой, С.О. Бороздина, Е.М. Лобанова, А.М. Свалова, Н.Н. Смирнова, Р.Р. Файзрахманова и других исследователей.

Представленные модели и подходы строились на упрощениях физических свойств породы и геометрии поровых каналов. В ряде работ вводились эмпирические коэффициенты для учета формы и траектории каналов. Однако, пористая среда рассматривалась как макрооднородная, не учитывалось наличие в породе поровых каналов различных размеров. Такие упрощения вполне допустимы при высоких проницаемостях. При вводе в разработку месторождений с проницаемостью ниже 1 мД, параметры поровых каналов являются критическими, так как существующие модели описывают процесс пропитки на больших временах со значительными погрешностями, что показано в данной работе. Поэтому задача моделирования пропитки в низкопроницаемых коллекторах является актуальной. С целью ее решения в данном исследовании предложена двухкомпонентная модель капиллярной пропитки с учетом давления закачки. Для определения свободных параметров разработанной модели используются алгоритмы оптимизации.

Задачей многокритериальной оптимизации занимались многие исследователи. Алгоритм многокритериального роя частиц MOPSO разработан К.А. Кольо и М.Р. Сьеррой на основе одноцелевого роя частиц, разработанного Д. Кеннеди и Р. Эберхартом. Также роевые алгоритмы развивали М.Д. Махмудабади, Ф. Танхайе. Исследованием генетических алгоритмов занимались, например, К. Деб и Г. Джейн. Большой вклад также внесли работы Д. Бланка, А.К. Гарагуловой, И. Даса, А.П. Карпенко, Г. Ма. Гибридизацией алгоритмов оптимизации занимались Ф. Абуру, Н.Г. Труонг, И. Черки и др. Алгоритмы многокритериальной оптимизации исследовали Д.Г. Арсеньев, М.Ф. Моледу и В.П. Шкодырев, С. О'Махони и др. Для оценки эффективности алгоритмов применяется мета-оптимизация гиперпараметров с помощью байесовской оптимизации, которая исследовалась многими авторами: М. Гаруани, Д. Снуком, Л.В. Уткиным и др. В данной работе алгоритмы многокритериальной оптимизации впервые применяются для определения свободных параметров модели капиллярной пропитки.

Целью работы является разработка математических моделей капиллярной пропитки в пористых средах, численного метода оптимизации и комплекса программ для обработки экспериментальных данных, а также оценка эффекта технологических операций на нефтяных месторождениях.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Разработка математической модели капиллярной пропитки, учитывающей наличие в среде каналов разных размеров. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

2. Разработка численного метода многоцелевой многопараметрической оптимизации для определения свойств породы на основе экспериментов по пропитке керна.

3. Разработка комплекса программ для автоматического определения параметров пористой среды на основе экспериментальных данных с использованием разработанного численного метода.

4. Численное моделирование капиллярной пропитки в трехмерном гидродинамическом симуляторе tНавигатор. Проверка адекватности модели на основе результатов опытно-промышленных работ.

Научная новизна:

1. Разработана новая модель капиллярной пропитки с учетом давления закачки и с применением концепции двухкомпонентной среды. Верификация на экспериментальных данных показала более высокую точность модели на больших временах по сравнению с известными моделями пропитки.

2. Предложен новый гибридный алгоритм многокритериальной оптимизации на основе алгоритма роя частиц SMPSO, метода кластеризации K-средних, генетического алгоритма NSGA-III и динамических критериев остановки. Произведена мета-оптимизация алгоритма для задачи определения свободных параметров модели пропитки, которые не определены в экспериментальных исследованиях. Предлагаемый алгоритм показал более высокую скорость и точность по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами.

3. Разработан новый комплекс программ, включающий в себя разработанные математическую модель и алгоритм оптимизации, позволяющий в автоматическом режиме определить параметры горной породы на основе экспериментальных данных.

4. Разработан метод моделирования капиллярной пропитки в нефтенасыщенном пласте в трехмерном гидродинамическом симуляторе. Предложен новый метод моделирования технологии циклической закачки воды и отбора нефти Huff and Puff. Сравнение с экспериментальными данными на керне и скважине показало соответствие модели фактическим данным. Определены оптимальные сроки закачки, остановки и добычи для технологии Huff and Puff.

Теоретическая и практическая значимость. Диссертационное исследование имеет как теоретический, так и практический характер. Модель капиллярной пропитки, предложенная в главе 1, может использоваться для решения различных фильтрационных задач не только в нефтенасыщенных коллекторах, но и в иных пористых средах. Метод оптимизации из главы 2 может найти практическое

применение для других моделей фильтрации со свободными параметрами. Комплекс программ, предлагаемый в главе 3, предназначен для обработки экспериментальных данных по исследованию капиллярной пропитки. Метод и результаты трехмерного моделирования в симуляторе tНавигатор из главы 4 представляют практическую ценность для нефтяной промышленности, так как могут использоваться для прогнозирования эффективности различных технологий закачки воды в пласт. Результаты исследования использованы в ООО “Газпромнефть-НТЦ”, получен акт внедрения. Также проведены опытно-промышленные работы по технологии водного Huff and Puff, получен положительный эффект на одной скважине. На разработанный комплекс программ получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Методология и методы исследования. В работе используются методы математического моделирования, теория фильтрации в пористых средах и алгоритмы оптимизации. Для описания капиллярной пропитки применяются системы дифференциальных уравнений фильтрации в многокомпонентной среде. Для оценки предлагаемых моделей производился поиск и анализ существующих экспериментальных исследований, на основе которых реализованы серии численных экспериментов. Для решения задачи многокритериальной оптимизации применяются роевые и генетические алгоритмы. Сравнение эффективности различных алгоритмов производится с помощью мета-оптимизации гиперпараметров. Разработанный гибридный алгоритм использует схему процессор-постпроцессор и алгоритм фильтрации промежуточной популяции с использованием кластеризации по методу K-средних, а также адаптивные критерии выхода из алгоритма. Для моделирования технологии Huff and Puff используется коммерческий симулятор tНавигатор и реализованная в нем модель двухкомпонентной среды.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новая одномерная двухкомпонентная математическая модель капиллярной пропитки с учетом давления закачки и массообмена между порами различного размера (п.1. паспорта специальности: Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений).

2. Последовательный гибридный алгоритм многоцелевой оптимизации на основе роя частиц (SMPSO) и генетического алгоритма (NSGA-III) с применением кластеризации по алгоритму K-средних для определения свойств породы на основе фильтрационных экспериментов (п.2. и п.4. паспорта специальности: Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий; Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели).

3. Комплекс программ, реализующий двухкомпонентную математическую модель капиллярной пропитки и гибридный алгоритм оптимизации для автоматизированной обработки результатов серии фильтрационных экспериментов на керне и определения его свойств (п.3. паспорта специальности: Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента).

4. Модель циклических воздействий на пласт с использованием капиллярной пропитки в специализированном трехмерном гидродинамическом симуляторе tНавигатор, а также результаты численных экспериментов, подтверждающих прирост добычи нефти от применения технологии водного Huff and Puff (п.6. и п.8. паспорта специальности: Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей; Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента).

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием стандартных методов математического моделирования. Все результаты численных экспериментов соответствуют широкой выборке экспериментальных данных из различных исследований. Полученные выводы согласуются с результатами других авторов. Предлагаемый метод моделирования капиллярной пропитки внедрен в производство и продемонстрировал высокую эффективность.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- 51 Школа-конференция «Актуальные проблемы механики» (Великий Новгород, 2024);
- XVI Научно-практическая конференция «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений» (Москва, 2024);
- VIII Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики» (Москва, 2023);
- XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023);
- Международная школа-конференция «Актуальные проблемы механики» (Санкт-Петербург, 2022);
- Семинар «Ассоциация активных аспирантов Газпромнефть-НТЦ» (Санкт-Петербург, 2023).

Личный вклад автора: постановка целей и задач исследования, разработка подходов, моделей, алгоритмов и комплекса программ. Все представленные результаты получены автором. Автор лично принимал участие в подготовке публикаций и докладов, участвовал в семинарах и конференциях.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 9 печатных работах. 2 опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, 4 – в научных журналах, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, 3 – в тезисах докладов. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений, содержит 145 страниц машинописного текста, 51 рисунок и 12 таблиц. Список литературы включает 124 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, формулируются цели и задачи; описывается новизна, теоретическая и практическая значимость результатов.

В **первой главе** рассматривается задача моделирования капиллярной пропитки в нефтенасыщенных пористых средах. Проведен анализ существующих экспериментальных исследований по пропитке на образцах горных пород, установлены зависимости между эффективностью капиллярной пропитки и площадью контакта с водой, наличием трещин, смачиваемостью породы и временем пропитки. Отмечено, что модель капиллярной пропитки должна отражать установленные экспериментальные зависимости.

Проведено исследование существующих одномерных моделей капиллярной пропитки. Рассмотрены четыре модели, которые основаны на упрощенном представлении породы в виде набора капиллярных трубок. Капиллярное давление определяется формулой Лапласа:

$$P_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{r_c}, \quad (1)$$

где P_c – капиллярное давление; θ – угол смачивания; r_c – радиус капилляра; σ – поверхностное натяжение.

Фильтрация в поровом канале описывается по уравнению Хагена-Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi r_c^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{x}, \quad (2)$$

где Q – дебит; P – давление; μ – вязкость; x – длина канала.

В моделях Хэнди и Ли-Хорна поры имеют цилиндрическую форму, в моделях Бенавенте и Кая поры представляются неидеальными, их форма сечения и траектория описываются параметрами α и τ . В модели Бенавенте не учитывается влияние формы порового канала на величину капиллярного давления, когда как в модели Кая форма

капилляра учитывается и в уравнении Лапласа, и в уравнении Хагена-Пуазейля. Масса пропитки в модели Кая определяется как:

$$M^2 = \frac{\rho^2 A^2 \varphi^2 (S_w - S_{wi})^2 \alpha^3 r_{av} \sigma \cos \theta}{2 \mu \tau^2} t, \quad (3)$$

где M – масса пропитки воды; ρ – плотность воды; A – площадь породы; φ – пористость; S_w – водонасыщенность после прохождения фронта вытеснения; S_{wi} – начальная водонасыщенность; r_{av} – средний радиус пор; t – время.

Для оценки точности моделей использовались результаты четырех экспериментальных исследований. Результаты численного моделирования на основе моделей Кая, Хэнди, Бенавенте и Ли-Хорна приведены на Рисунке 1.

В каждом эксперименте наблюдается значительное отклонение моделей Хэнди и Ли-Хорна, так как данные модели предполагают цилиндрическую форму поры, когда как реальная порода сложена хаотической укладкой минеральных зерен, а поры имеют неправильную форму. Наибольшую точность показывают модели Бенавенте и Кая, которые учитывают кривизну поровых каналов. Отмечено, что на больших временах данные модели пропитки имеют значительную погрешность, что связано с представлением пористой среды в виде набора одинаковых капилляров, когда как горная порода содержит поры разного размера, в которых фильтрация идет с различной скоростью.

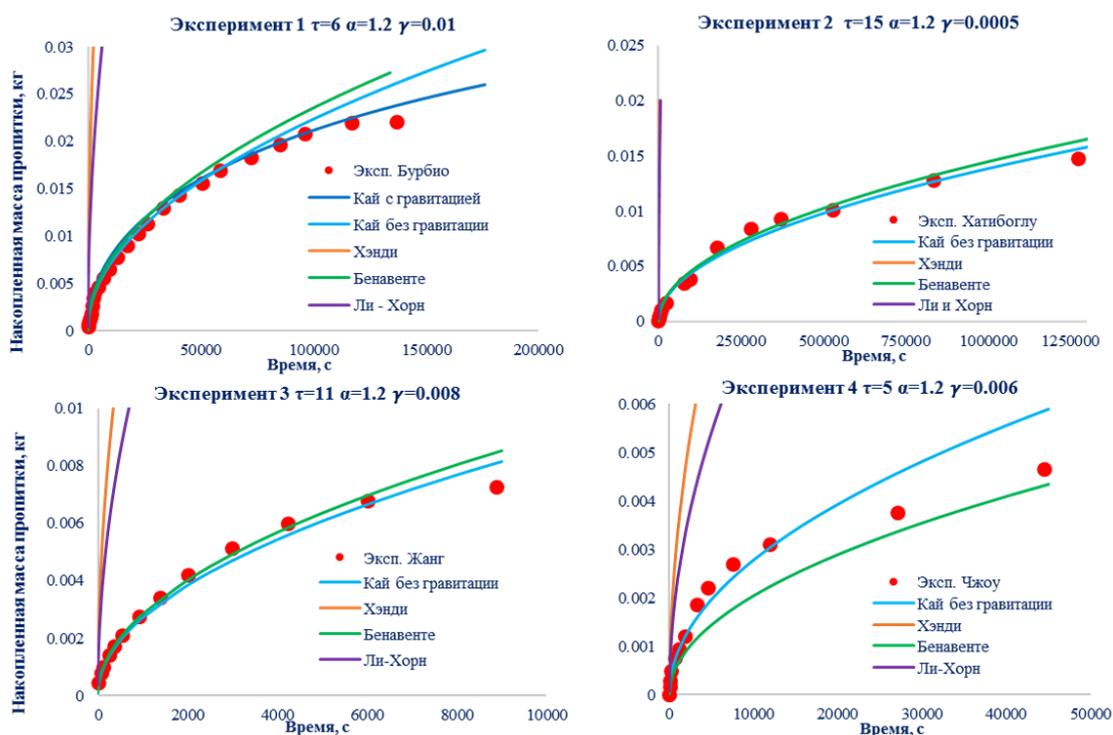


Рисунок 1 – Зависимость накопленной массы пропитки от времени, рассчитанная для четырех экспериментов с использованием.

Также рассмотрена модель Шмида, которая учитывает взаимодействие между

нефтью и водой с помощью использования теории двухфазной фильтрации Бакли-Левретта и экспериментальных кривых относительных фазовых проницаемостей и капиллярного давления, что требует проведения дополнительных исследований. Для проверки модели использовался только один эксперимент, так как в остальных не проводилось измерение кривой капиллярного давления. Результаты численного моделирования и сравнение с моделью Кая приведены на Рисунке 2. Сделан вывод, что модель Шмида позволяет воспроизвести процесс капиллярной пропитки на малых временах, но на больших временах погрешность возрастает, что также связано с представлением породы в виде набора капилляров одного размера.

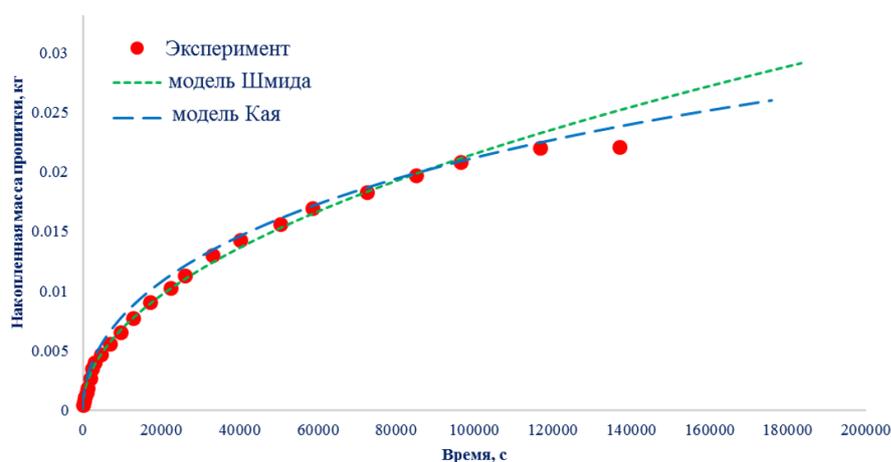


Рисунок 2 – Зависимость накопленной массы пропитки от времени по моделям Шмида и Кая

Выдвинута гипотеза о том, что для повышения точности моделирования капиллярной пропитки на больших временах необходимо применить концепцию многокомпонентной среды – представить горную породу в виде набора поровых каналов разного размера. Помимо этого, рассмотренные модели позволяют описать только самопроизвольную капиллярную пропитку, а для задач нефтяного инжиниринга необходимо учитывать и дополнительное внешнее давление закачки. Для решения данной проблемы предложена новая модель капиллярной пропитки, описывающая данный процесс в двухкомпонентной пористой среде и учитывающая внешнее давление закачки и массообмен между двумя средами. Модель представляет собой систему трех дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dM_1(t)}{dt} = k_1^2 \frac{z_1}{M_1(t)} + \frac{dM_3(t)}{dt}, \\ \frac{dM_2(t)}{dt} = k_2^2 \frac{z_2}{M_2(t)} - \frac{dM_3(t)}{dt}, \\ \frac{dM_3(t)}{dt} = k_3^2 \frac{z_3}{M_3(t)} n \left(\frac{M_2(t)}{k_2} - \frac{M_1(t)}{k_1} \right), \end{cases} \quad (4)$$

где 1 – среда с порами малого размера, 2 – среда с порами большого размера, 3 – промежуточная среда, через которую происходит массообмен, n – количество промежуточных капилляров между средами 1 и 2. Начальные условия нулевые.

Коэффициенты k_i и z_i определяются как

$$k_i = \rho A_i \varphi_i (S_w - S_{wi}), \quad (5)$$

$$z_i = \frac{a^3 r_i \sigma \cos \theta}{4\mu\tau^2} + \frac{a^4 r_i^2 P_{inj}}{8\mu\tau^2}, \quad (6)$$

где i – номер среды, P_{inj} – давление закачки.

Для оценки точности модели использована серия экспериментов по пропитке с различными давлениями закачки на одном и том же образце горной породы. На Рисунке 3 приведены результаты численного моделирования. Отмечено, что модель двухкомпонентной среды позволяет воспроизвести эксперименты с лучшей точностью. Для опыта без внешнего давления закачки можно выделить рост погрешности модели на третьей стадии пропитки. Но в экспериментах с давлением закачки этого не наблюдается. Причиной является более сложное строение пористой среды, в которой самопроизвольная пропитка в порах малого диаметра идет с малой скоростью, а при наличии внешнего давления закачки скорость возрастает, и третья стадия пропитки не выделяется. Для проверки данной гипотезы предложена модель трехкомпонентной среды:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM_1(t)}{dt} = k_1^2 \frac{z_1}{M_1(t)} + \frac{dM_3(t)}{dt} - \frac{dM_5(t)}{dt} \\ \frac{dM_2(t)}{dt} = k_2^2 \frac{z_2}{M_2(t)} - \frac{dM_3(t)}{dt} \\ \frac{dM_3(t)}{dt} = k_3^2 \frac{z_3}{M_3(t)} n \left(\frac{M_2(t)}{k_2} - \frac{M_1(t)}{k_1} \right), \\ \frac{dM_4(t)}{dt} = k_4^2 \frac{z_4}{M_4(t)} + \frac{dM_5(t)}{dt} \\ \frac{dM_5(t)}{dt} = k_5^2 \frac{z_5}{M_5(t)} n \left(\frac{M_1(t)}{k_1} - \frac{M_4(t)}{k_4} \right) \end{array} \right. \quad (7)$$

где 5 – среда с самыми маленькими порами, 4 – промежуточная среда массообмена между 3 и 5 средами.

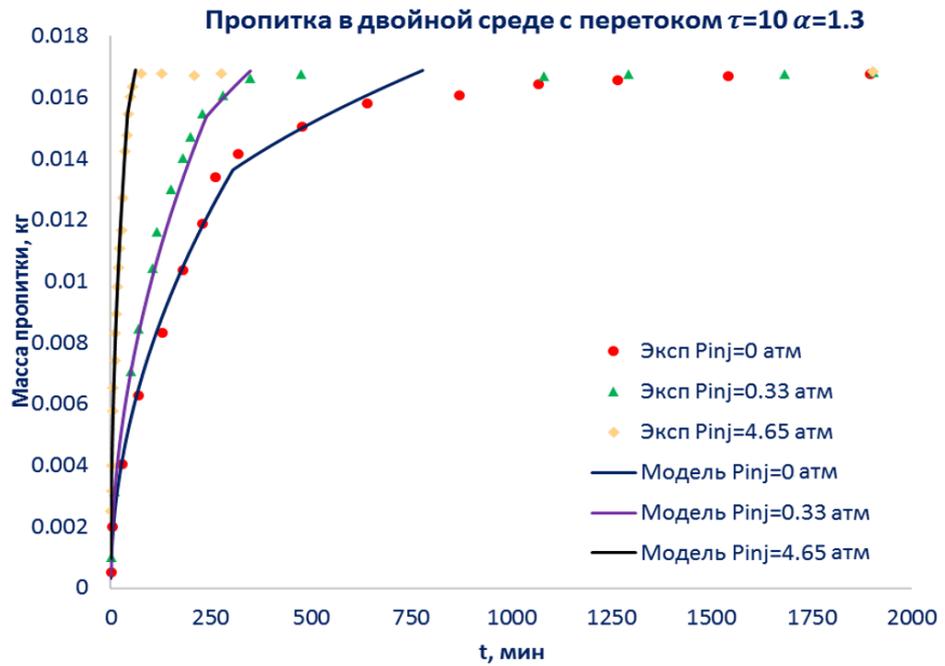


Рисунок 3 – Экспериментальные кривые пропитки и результаты расчетов с различными давлениями закачки в двухкомпонентной среде без массообмена

На Рисунке 4 приведена зависимость массы пропитки от времени для эксперимента без давления закачки, для двухкомпонентной и трехкомпонентной среды. Можно увидеть, что модель трехкомпонентной среды (7) воспроизводит экспериментальные данные с более высокой точностью, но использование трехкомпонентной модели для экспериментов с давлением закачки избыточно, так как при высокой скорости фильтрации на больших временах двухкомпонентная модель обладает достаточной точностью.

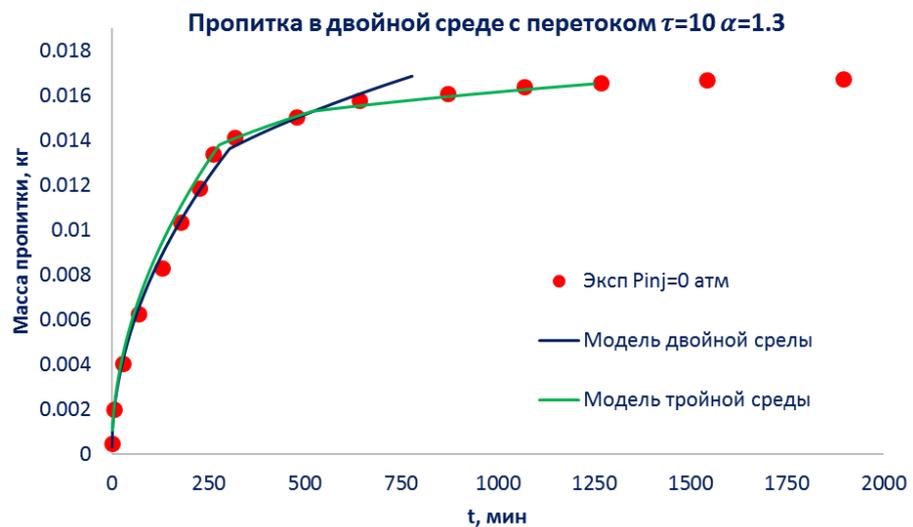


Рисунок 4 – Сравнение результатов моделирования в двухкомпонентной среде (4) и трехкомпонентной (7) с экспериментальными данными
 Разработанная модель имеет набор свободных параметров, характеризующих

свойства горной породы. Определение этих параметров является сложной задачей, поэтому в данной работе предложено использовать алгоритмы оптимизации для автоматизации данного процесса.

Вторая глава посвящена тестированию и разработке алгоритмов многокритериальной оптимизации для определения набора свободных параметров модели капиллярной пропитки (4) на основе результатов серии экспериментов. Отмечено, что модель капиллярной пропитки содержит 10 параметров пористой среды, которые сложно определить в лабораторных условиях (Таблица 1). Помимо этого, для настройки модели и ее дальнейшего использования в задачах нефтяного инжиниринга необходимо минимум три эксперимента с различными давлениями закачки. Следовательно, необходимо решить задачу многокритериальной многопараметрической оптимизации, где в роли варьируемых параметров выступают параметры модели, а в роли целевых функций – невязки между моделью и экспериментами:

$$\min\{f_1(\bar{X}), f_2(\bar{X}), f_3(\bar{X})\} = f_1(\bar{X}^*), f_2(\bar{X}^*), f_3(\bar{X}^*), \quad (8)$$

где $f_k(\bar{X})$ – целевая функция эксперимента $k = 1, 2, 3$; \bar{X} – вектор варьируемых параметров; \bar{X}^* – оптимальный набор параметров.

Рассматривается следующая целевая функция:

$$f_k(\bar{X}) = \sum_{i=1}^n |M_i^{k,exp} - M_i^{k,mod}(\bar{X})|, \quad (9)$$

где n – количество временных шагов; i – номер шага по времени; M^{exp}, M^{mod} – масса пропитки в эксперименте и в модели.

Таблица 1 – Варьируемые параметры модели капиллярной пропитки

№	Параметр		Ед. изм.
1	σ	Поверхностное натяжение	Н · м
2	θ	Угол смачивания	°град
3	φ_2	Пористость среды 2	д.ед.
4	τ	Параметр кривизны каналов	д.ед.
5	a	Параметр формы каналов	д.ед.
6	φ_3	Пористость среды 3	д.ед.
7	n	Количество промежуточных пор среды 3 на единицу длины	1/м
8	A_3	Площадь контакта среды 3	м ²
9	y	Коэффициент, для определения r_1	д.ед.
10	r_3	Радиус промежуточных пор	м

Проведено исследование существующих многокритериальных оптимизационных алгоритмов. Рассмотрено 5 наиболее распространенных алгоритмов оптимизации: генетические алгоритмы NSGA-II, NSGA-III, методы роя частиц SMPSO, OMOPSO, эволюционный алгоритм MOEA/D. Для задачи определения свободных параметров

модели капиллярной пропитки необходимо определить наиболее эффективный алгоритм по точности и скорости решения. Для тестирования алгоритмов выбрано 5 тестовых функций, чей Парето-фронт близок к Парето-фронт решаемой задачи – DTLZ1, DTLZ2, MW8, WFG1, WFG2. Наиболее близкую форму Парето-фронта к рассматриваемой задаче имеют функции DTLZ1, WFG1 и WFG2.

Каждый алгоритм обладает набором гиперпараметров, которые влияют на скорость и точность решения в конкретной задаче. Поэтому для объективного сравнения алгоритмов между собой решалась задача мета-оптимизации для каждого метода и для каждой тестовой задачи. У каждого алгоритма несколько гиперпараметров, поэтому задача мета-оптимизации также является многопараметрической. Для оценки качества решения использовались метрики HV (H-Value) и IGD (Inverted Generational Distance). Для оценки эффективности алгоритмов с учетом времени работы использовался метод взвешенной суммы, в котором метрики качества и точности решений суммируются с затраченным временем оптимизации с весовым коэффициентом:

$$F = IGD \cdot \frac{1}{\text{кг}} + |\Delta HV| \cdot \frac{1}{\text{кг}^3} + 0.1 \cdot t \cdot \frac{1}{\text{с}} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Для решения одноцелевой задачи мета-оптимизации выбран алгоритм Байесовской оптимизации. Все алгоритмы оптимизации реализованы на языке программирования Python. На Рисунке 5 приведены взвешенные суммы для всех алгоритмов и тестовых задач. В задачах DTLZ2 и MW8 лидирует алгоритм NSGA-III, эти задачи являются наименее сложными и требуют меньших вычислительных ресурсов. В более сложных задачах DTLZ1, WFG1, WFG2 алгоритм SMPSO наиболее эффективен. Сделан вывод, что алгоритмы NSGA-III и SMPSO наиболее эффективны в данных задачах, при этом SMPSO лучше работает с задачами с большей вычислительной сложностью, а NSGA-III – с более простыми.

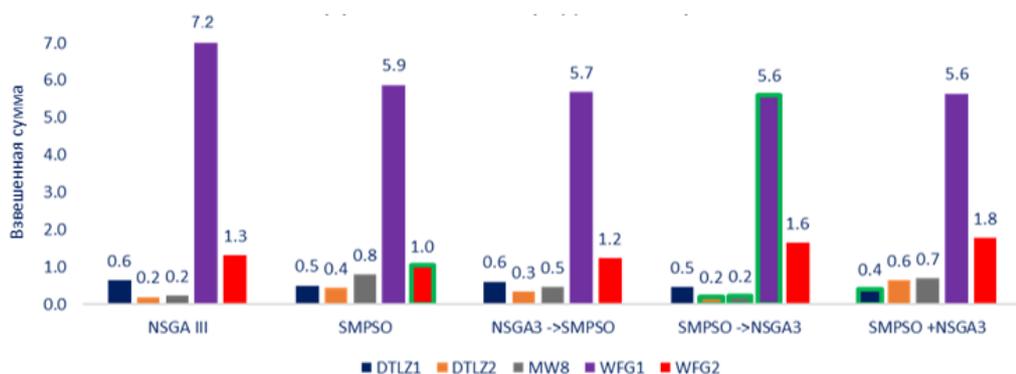


Рисунок 5 – Эффективность оптимизационных алгоритмов на тестовых функциях; зеленым контуром выделены наименьшие взвешенные суммы по тестовым задачам

Для получения эффективного во всех тестовых задачах алгоритма предложено использовать гибридный оптимизационный алгоритм, так как генетические алгоритмы лучше работают с локальным поиском, а роевые – с глобальным. Протестированы различные подходы к гибридации: процессор/постпроцессор (последовательности NSGA-III – SMPSO и SMPSO – NSGA-III) и параллельный запуск двух алгоритмов с регулярным обменом между популяциями. Сравнение мета-оптимизации гибридных алгоритмов с моно-алгоритмами показало, что наибольшей эффективностью в большинстве тестовых задач обладает гибрид типа процессор/постпроцессор, в котором сначала использует алгоритм SMPSO для глобального поиска, после которого популяция передается в NSGA-III для локального поиска. Для достижения максимальной эффективности алгоритма предложено использовать метод кластеризации промежуточной популяции К-средних с целью исключения кластеров неудачных решений из выборки при ее передаче из роевого алгоритма в генетический. Также введены динамические критерии остановки алгоритмов на основе отслеживания изменения показателей качества решений HV и SP (Spacing), так как обнаружено, что алгоритмы находят удовлетворительный Парето-фронт раньше, чем заканчивается заданное количество итераций. Итоговый алгоритм в виде блок-схемы приведен на Рисунке 6.



Рисунок 6 – Итоговый гибридный алгоритм оптимизации SMPSO и NSGA-III с кластеризацией K-means и динамическими критериями остановки

Предложенный гибридный алгоритм многокритериальной оптимизации с кластеризацией промежуточной популяции и динамическими критериями остановки проверен на тестовых функциях. Алгоритм показал наибольшую эффективность во всех тестовых функциях (Рисунок 7, А). Прирост эффективности составил от 7% до 311% в зависимости от функции (Рисунок 7, Б).



Рисунок 7 – Сравнение итогового алгоритма с другими рассмотренными алгоритмами А – сравнение по взвешенной сумме, Б – прирост эффективности относительно моно-алгоритмов

В **третьей главе** предложен комплекс программ, позволяющий обрабатывать наборы экспериментальных данных по капиллярной пропитке на образцах горной породы и определять свободные параметры модели пропитки (4) с целью использования их для моделирования технологических операций на нефтяных месторождениях. Комплекс включает четыре основных компонента: модуль предварительной обработки данных, алгоритм решения двухкомпонентной системы дифференциальных уравнений капиллярной пропитки (4), гибридный алгоритм оптимизации SMPSO - NSGA-III с кластеризацией и динамическими критериями выхода (Рисунок б), модуль анализа результатов.

Модуль обработки входных данных использует табличный файл, содержащий экспериментальные данные фильтрационных исследований при различных давлениях закачки.

Вычислительный модуль использует метод Рунге-Кутты 4-го порядка, реализованный в функции `solve_ivp` из библиотеки SciPy, для решения системы дифференциальных уравнений модели капиллярной пропитки (4).

Оптимизационный модуль состоит из реализаций алгоритмов SMPSO, NSGA-III, K-means и критериев выхода из алгоритма, блок-схема представлена на Рисунке б.

Модуль обработки результатов отображает трехмерные графики, на которых можно определить качество полученного решения.

Проведено тестирование программного комплекса на эксперименте по

насыщению керна с давлениями закачки 0 атм, 0.33 атм и 4.65 атм. Фактические зависимости накопленного объема закачанной воды от времени приведены на Рисунке 8, также приведены результаты ручной настройки свободных параметров модели (4) вместе с результатами применения гибридного алгоритма. Предложенный комплекс программ воспроизвел все эксперименты, оптимальное решение имеет координаты невязок с экспериментом - (0.0014;0.0050;0.0012). Алгоритм провел 95 итераций/поколений за 275 секунд.

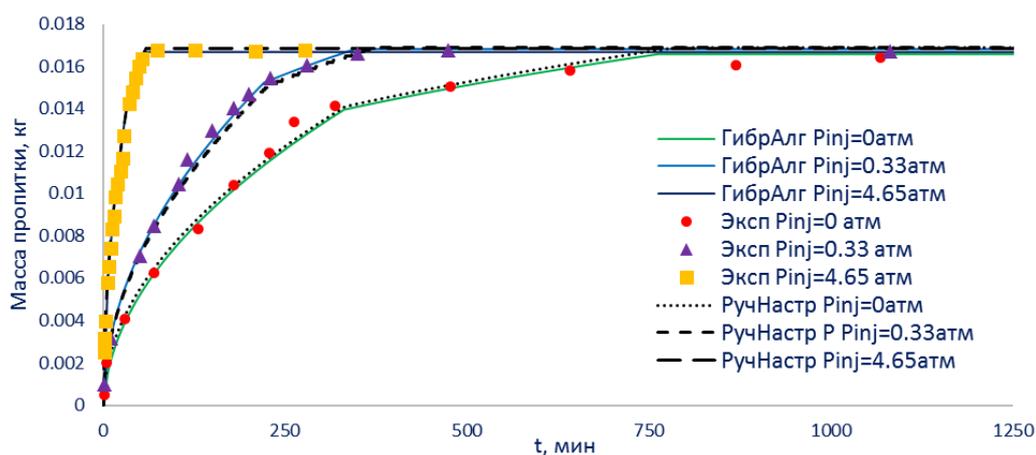


Рисунок 8 – Сравнение ручного определения свободных параметров модели с гибридным алгоритмом (сплошные линии)

Для оценки эффективности разработанного алгоритма протестированы SMPSO и NSGA-III с осредненными оптимальными гиперпараметрами из результатов мета-оптимизации и с заданным количеством итераций, равным итерациям в гибридном алгоритме. Алгоритм SMPSO выполнил 95 итераций за 271 секунду, оптимальная точка имеет координаты (0.0186;0.0185;0.0058). Алгоритм NSGA-III выполнил 95 итераций за 282 секунды, оптимальная точка имеет координаты (0.0018;0.0068;0.0749). По координатам оптимальных точек трех алгоритмов видно, что все целевые функции (невязки с экспериментами) предложенного гибридного метода меньше, чем невязки в одиночных алгоритмах. Снижение невязок в предлагаемом алгоритме составило от 22% до 79%.

Четвертая глава посвящена разработке и тестированию трехмерных фильтрационных моделей в масштабах керна и скважины в гидродинамическом программном комплексе тНавигатор. Важной задачей для нефтяного инжиниринга является оценка способности коммерческого симулятора моделировать процессы капиллярной пропитки. Для решения данной задачи в тНавигаторе использовалась двухфазная изотермическая модель черной нефти. Произведено моделирование капиллярной пропитки в масштабах керна. Фильтрационная модель симулятора требует большого количества исходных данных, значительная часть которых является результатом настройки модели на экспериментальные данные. Неизвестные свойства

пласта определялись с помощью встроенного алгоритма многоцелевого роя частиц MOPSO. Используемая в программном комплексе целевая функция аналогична функции из 2 главы:

$$f_k(\bar{X}) = \sum_{i=1}^n \frac{|M_i^{k,exp} - M_i^{k,mod}(\bar{X})|}{g \cdot M_i^{k,exp}}, \quad (11)$$

где g – допустимая невязка по параметру.

Лучшее решение выбиралось как ближайшее к идеальной точке (Рисунок 9). Сделан вывод, что стандартная однокомпонентная модель фильтрации позволяет воспроизвести только начальный период пропитки, а на больших временах модель отклоняется, как и в однокомпонентных математических моделях.

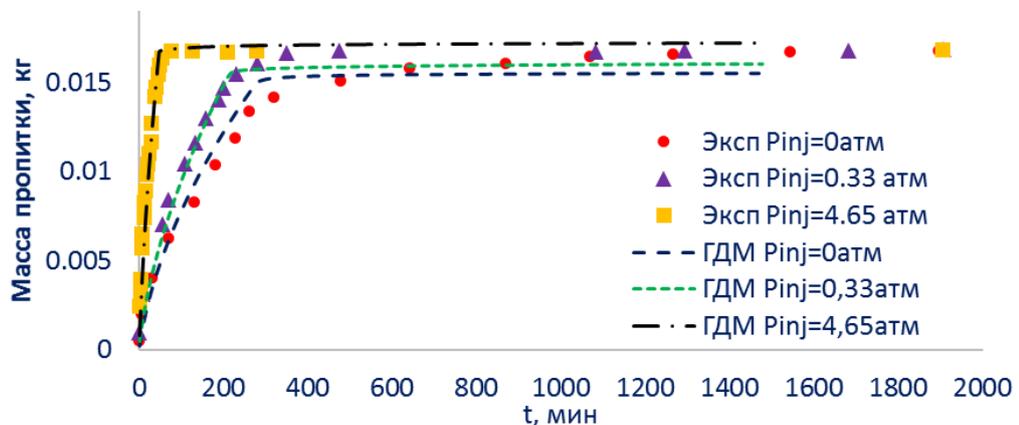


Рисунок 9 – Результаты моделирования пропитки с давлением закачки в одинарной среде

Решением также стало использование модели двухкомпонентной среды, включающей в себя 16 параметров, которые могут варьироваться в определенных диапазонах, что связано как с невозможностью их прямого измерения, так и с сложностью прогнозирования распространения свойств породы в геологических телах. Определение свободных параметров также являлось задачей оптимизации. Использование предложенной математической модели фильтрации (4) и алгоритма оптимизации позволило сократить размерность оптимизационной задачи с 16 до 11. Проведено сравнение подхода с полным набором свободных параметров с сокращенным набором. Задача с 16 параметрами и 3 целевыми функциями решена за 10.5 часов вычислительного времени, для сокращенного набора параметров потребовалось 5 минут для определения пяти параметров на математической модели и 7 часов для оптимизации остальных одиннадцати. При этом сравнение результирующих значений целевой функции показало, что решение для сокращенного набора не только быстрее, но и точнее по двум экспериментам из трех.

Использование данного подхода позволило воспроизвести кривые пропитки для трех фильтрационных экспериментов с различными давлениями закачки (Рисунок 10) за минимальное время.

Исследована возможность использования разработанного метода моделирования пропитки для оценки эффективности технологии водного Huff and Puff, которая представляет собой циклическую закачку воды в нефтяную скважину с последующей остановкой на пропитку и возвратом в добычу. Технология может применяться на безводных низкодебитных скважинах с низким пластовым давлением при отсутствии эффекта от системы поддержания пластового давления.

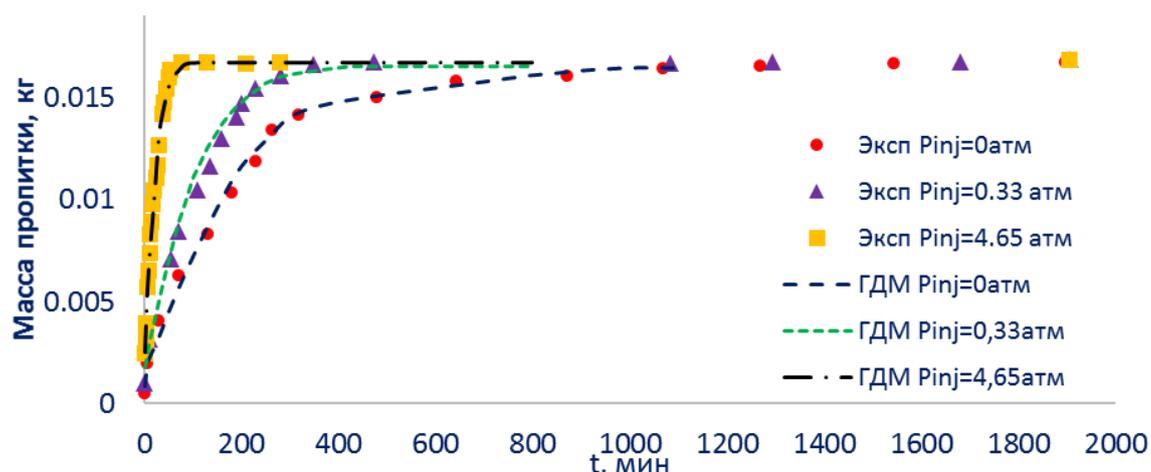


Рисунок 10 – Зависимость массы пропитки от времени для трех экспериментов, полученная в ходе оптимизации сокращенного набора свободных параметров

Произведено моделирование пяти циклов Huff and Puff на низкопроницаемом керне. Сравнение с экспериментальными данными показало, что модель воспроизводит продвижения фронта вытеснения и зависимости коэффициента извлечения нефти от времени пропитки, количества циклов и давления закачки с высокой точностью. Моделирование технологии водного Huff and Puff на скважине так же показало соответствие с результатами опытно-промышленных работ (ОПР), проведенных в КНР.

Проведены ОПР на месторождении X в Западной Сибири по технологии водного Huff and Puff. В качестве скважин кандидатов выбраны 4 скважины: одна горизонтальная с многостадийным гидроразрывом пласта, три наклонно-направленных с одностадийным гидроразрывом. Ввиду различных технологических проблем (нецелевая закачка, неоптимальные сроки закачки и остановки, конструкция скважин-кандидатов) прирост дебита нефти после одного цикла наблюдался в одной скважине. Моделирование применения технологии на скважине №3 (Рисунок 11) показало соответствие разработанной модели с экспериментальными данными.

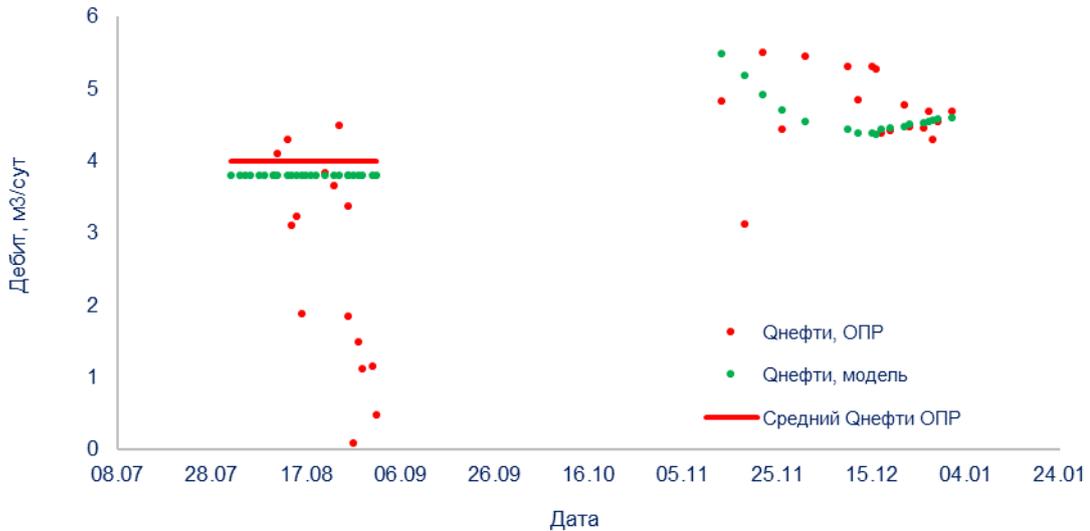


Рисунок 11 – Сравнение результатов моделирования с опытно-промышленными работами по скважине №3

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Разработана новая двухкомпонентная математическая модель капиллярной пропитки с учетом внешнего давления закачки и неоднородности поровых каналов. Для воспроизведения капиллярной пропитки на больших временах предложена модель двухкомпонентной среды, состоящая из пор различного диаметра, между которыми происходит массообмен. Численные эксперименты показали соответствие модели и экспериментальных данных.

2. Предложен гибридный последовательный алгоритм многоцелевой оптимизации на основе роя частиц и генетического алгоритма (NSGA-III) с применением алгоритма кластеризации K-средних (K-means) для определения свойств породы (свободных параметров модели) на основе фильтрационных экспериментов. Данный алгоритм показал большую эффективность и лучшую сходимость с фактическими данными по сравнению с оригинальными алгоритмами SMPSO и NSGA-III.

3. Разработан комплекс программ, реализующий разработанные модели и алгоритмы, позволяющий на основе экспериментальных данных по капиллярной пропитке автоматически определить свободные параметры модели фильтрации и свойства горной породы. Проверка комплекса программ на реальной задаче показала прирост скорости и точности оптимизации по сравнению с существующими алгоритмами.

4. Предложен новый метод моделирования циклических воздействий на пласт с использованием капиллярной пропитки в специализированном трехмерном гидродинамическом симуляторе tНавигатор. Данный метод верифицирован на экспериментальных данных в масштабе керна и в масштабе единичной скважины.

Моделирование технологии водного Huff and Puff показало соответствие с ОПР на скважине.

Предложенные модели, алгоритмы и комплекс программ могут найти широкое применение в отраслях науки, связанных с изучением фильтрации в горных породах, так как явление капиллярной пропитки встречается во всех пористых средах. Особую актуальность результаты данной диссертационной работы имеют в сфере нефтяного инжиниринга, где новые технологии могут задействовать данный эффект, например, при заводнении с поверхностно-активными веществами. Оценка пропитки также важна при геологическом моделировании нефтяных залежей, так как капиллярность является определяющим параметром при обосновании положения водонефтяного контакта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science, Scopus и изданиях из списка ВАК РФ

1. Цыкунов, О. И. Математическая модель фильтрации с учетом капиллярных сил в мультипоровой среде / О. И. Цыкунов // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, № 10. – С. 45-55.

2. Цыкунов, О. И. Разработка гибридного алгоритма многокритериальной оптимизации для восстановления свойств пористой среды по фильтрационным экспериментам / О. И. Цыкунов // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2025. – № 3. – С. 41-61.

3. Цыкунов, О. И. Сравнительный анализ математических моделей капиллярной пропитки на экспериментальных данных / О. И. Цыкунов // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2024. – № 1. – С. 89-107.

4. Tsykunov, O. I. (2025). Modelling of Water Huff and Puff Technology in a Low Permeability Oilfield. In: Altenbach, H., Kuzkin, V. (eds) Advanced Problems in Mechanics. Springer, Cham.

5. Цыкунов, О. И. Анализ эффективности технологии водного Huff and Puff на основе мирового опыта применения и лабораторных исследований / О. И. Цыкунов, И. С. Каешков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 4. – С. 22-33.

6. Цыкунов, О. И. Исследование и опыт применения технологии водного Huff and Puff на нефтяном месторождении с низкопроницаемым коллектором / О. И. Цыкунов, И. С. Каешков // PRОнефть. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6, № 3. – С. 114-120.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

7. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программа восстановления свойств породы по результатам фильтрационных экспериментов / Ц. О.И. ; ФГАОУ ВО СПбПУ. — № 2025684169; заявл. 27.08.2025; опубл. 18.09.2025, 2025684993 (Рос. Федерация).*

В сборниках трудов конференций

8. Цыкунов, О. И. Анализ применимости однофазных и двухфазных математических моделей капиллярной пропитки / О. И. Цыкунов // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике: Сборник тезисов докладов. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. – С. 1199-1201.

9. Цыкунов, О. И. Исследование сходимости математических моделей капиллярной пропитки с экспериментом / О. И. Цыкунов // Фундаментальные и прикладные задачи механики: Материалы Международной научной конференции, Москва, 5–8 декабря 2023 года. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2024. – С. 281-285.

10. Цыкунов, О. И. Математическое моделирование фильтрации с учетом капиллярных сил в двойной среде / О. И. Цыкунов // 51 школа-конференция «Актуальные проблемы механики», 19-21 июня 2024 года. – Великий Новгород: 2024. – С. 264-265.