



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Еремян Грачик Араикович**

**ВЫБОР ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ  
ЗАДАЧИ АВТОАДАПТАЦИИ ГЕОЛОГО-  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка  
информации

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

**Научный руководитель: Рукавишников Валерий Сергеевич**

PhD, доцент отделения нефтегазового дела  
Инженерной школы природных ресурсов  
Томского политехнического университета

**Официальные оппоненты: Хасанов Марс Магнабиевич**

Доктор технических наук, профессор, публичное  
акционерное общество «Газпром нефть», г. Санкт-  
Петербург, директор по науке

**Осипцов Андрей Александрович**

Доктор физико-математических наук, автономная  
некоммерческая образовательная организация  
высшего образования «Сколковский институт  
науки и технологий», г. Москва, директор  
проектного центра по энергопереходу и ESG,  
профессор

Защита состоится 2 июня 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.15 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84/3, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru).

Автореферат разослан 29 марта 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.15,  
кандидат технических наук



Пак Александр  
Яковлевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время цифровые геолого-гидродинамические модели (ГГДМ) пластов повсеместно применяются при разработке месторождений углеводородного сырья. Трехмерные численные модели позволяют объединять комплексные данные о пластах-коллекторах, имитировать фильтрацию пластового флюида и помогают принимать более обоснованные решения по разработке месторождений углеводородов. После первичного построения трехмерной модели производится ее гидродинамический расчет, и полученные показатели разработки сравниваются с историческими данными. Ввиду сложности объекта моделирования и наличия присущих неопределенностей в геологических, петрофизических и прочих параметрах модели, влияющих на течение флюида, расчетные показатели разработки месторождения отличаются от исторических. Для того, чтобы модель воспроизводила историю необходимо произвести адаптацию на данные истории, которая заключается в корректировке параметров в диапазонах их неопределенности. Эта процедура является необходимой для достоверного прогнозирования поведения пласта. До недавнего времени, данная трудоемкая процедура проводилась в ручном режиме путем правок параметров модели, вводимых специалистом по гидродинамическому моделированию на основе его понимания и интуиции. В настоящее время широкое распространение получили методы автоадаптации, представляющей собой автоматизированную корректировку параметров модели пласта для достижения наилучшей сходимости между модельными и историческими динамическими показателями. Путем воспроизведения истории разработки месторождения осуществляется уточнение основных фильтрационно-емкостных параметров пласта, заложенных в модель.

Неотъемлемыми составляющими автоадаптации являются оптимизационный алгоритм и целевая функция (ЦФ), позволяющие находить адаптированные модели. ЦФ представляет собой функцию нескольких переменных, подлежащую минимизации с помощью оптимизационного алгоритма в процессе адаптации модели. Являясь мерой расхождения между расчетом и историей, ЦФ с помощью оптимизационного алгоритма обеспечивает итеративное улучшение адаптации, позволяя уточнить параметры пласта.

**Степень разработанности темы.** Изучением проблематики выбора ЦФ для автоадаптации занимались такие ученые, как Ю.Ю. Хутахеан, В.В. Демьянов, М.А. Кристи, Р.Ф. Шульц-Ригерт, К.Д. Стивен, П. Хан-Юнг, Р.Бут, З. Бозаркуна, Ю.Д. Динг, А.К. Бертолини, Ф.Р. Алмеида. Формулировка ЦФ важна, поскольку ее значение напрямую влияет на процесс оптимизации, позволяя алгоритму двигаться в верном направлении в поиске решений. Однако, на сегодняшний день данная тема изучена недостаточно. Не существует единого подхода или метода для задания вида ЦФ, который бы обеспечивал достижение задач адаптации с наименьшими вычислительными затратами.

Таким образом, возникает актуальная проблема исследования влияния формулировки ЦФ на адаптацию модели, а также актуальная задача создания метода задания наиболее эффективного вида ЦФ для автоадаптации.

**Цель исследования** – разработка метода выбора наиболее эффективного вида целевой функции для автоматизированной адаптации геолого-гидродинамических моделей месторождений углеводородов.

**Основные задачи исследования:**

1. Выполнить анализ существующих подходов к заданию ЦФ для автоадаптации геолого-гидродинамических моделей.
2. Создать синтетическую модель залежи для вычислительных экспериментов по изучению влияния вида ЦФ на эффективность автоадаптации.
3. Исследовать влияние на эффективность ЦФ: математического выражения невязки, компонентного состава ЦФ, способов нормировки и взвешивания невязок. Сформулировать метод задания наиболее эффективного вида ЦФ в зависимости от задачи адаптации и исходных данных;
4. Апробировать разработанный метод на модели реального нефтяного месторождения.

**Объектом исследования** данной работы является автоматизированная адаптация геолого-гидродинамической модели месторождения углеводородов.

**Предметом исследования** является формула ЦФ для автоматизированной адаптации геолого-гидродинамической модели.

**Методы исследования.** Для решения задач, сформулированных в работе, использовались методы численного геолого-гидродинамического моделирования разработки месторождений углеводородов, системного анализа и математической статистики.

**Научная новизна работы.**

1. Предложено и научно обосновано определение эффективности целевой функции, заключающееся в способности адаптированной геолого-гидродинамической модели достигать заданных значений набора критериев качества адаптации месторождения углеводородов при минимальных вычислительных затратах.
2. Разработана синтетическая геолого-гидродинамическая модель, на основе которой установлены степень и характер влияния на эффективность целевой функции математического выражения невязки, ее компонентного состава, способов нормировки и взвешивания невязок.
3. Разработан, теоретически и экспериментально исследован и апробирован на реальных данных метод выбора наиболее эффективной целевой функции для автоадаптации геолого-гидродинамической модели месторождения углеводородов.

**Теоретическая значимость работы.** Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что сформулированные автором теоретические положения вносят вклад в развитие области автоматизированной адаптации геолого-гидродинамических моделей месторождений углеводородов. Задача выбора вида ЦФ получила научное обоснование в результате выполнения аналитического описания и вычислительных экспериментов на трехмерной численной модели.

**Практическая значимость работы.** Практическая значимость результатов работы состоит в том, что теоретические и практические предложения, сделанные

в работе, могут использоваться специалистами в области моделирования разработки месторождений углеводородов. Разработанный метод выбора ЦФ позволяет обоснованно задавать одну из ключевых и неотъемлемых частей процесса автоадаптации геолого-гидродинамических моделей.

Практическая значимость результатов исследования подтверждается их использованием в ходе выполнения научно-исследовательских работ, в том числе с помощью программной реализации разработанного метода выбора ЦФ.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Использование эффективной целевой функции гарантирует достижение заданных значений набора критериев качества адаптации месторождения углеводородов в отличие от традиционного подхода.
2. Синтетическая геолого-гидродинамическая модель позволяет выявлять степень и характер влияния на эффективность целевой функции ее компонентного состава, способов нормировки и взвешивания невязок.
3. Предложенный метод выбора целевой функции для автоадаптации геолого-гидродинамической модели месторождения углеводородов обеспечил уменьшение отклонения по накопленной добыче жидкости с 29% до 1%, отклонения по накопленной закачке жидкости с 22% до 1%, максимального отклонения месячной добычи нефти в 2 раза по сравнению с традиционным подходом.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных в ходе настоящей диссертационной работы результатов обеспечивается сравнением разработанного метода с существующими подходами к заданию ЦФ, проверкой теоретических положений и выводов серией численных экспериментов, результатами апробации предложенного метода на реальных данных, а также положительным эффектом от внедрения полученных результатов в производство и учебную деятельность.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в деятельность Центра компетенций по гидродинамическому моделированию ООО «Газпромнефть НТЦ», а также в учебный процесс ТПУ. Полученные результаты работы используются в рамках научно-исследовательской работы для ООО «Газпромнефть НТЦ» «Создание методологии и интеллектуальной системы автоматизированной адаптации геолого-гидродинамических моделей, управляемой геологическими неопределенностями», договор №13.12-68/2018у от 01.02.2018. Получен патент РФ №2754741 на изобретение «Способ адаптации геолого-гидродинамической модели пласта», в котором описан разработанный в результате диссертационной работы метод. Патент и акты внедрения приложены к диссертационной работе.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: Третья Научно-Техническая Конференция ООО "ИНК", 6-7 декабря 2018, г. Иркутск; XII научно-практическая конференция «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений», 23-25 апреля 2019, г. Санкт-Петербург; Российская нефтегазовая техническая конференция SPE, 2019, г. Москва; Семинар по обмену опытом по техническим проектам компании ООО «Газпромнефть НТЦ»,

связанным с адаптацией гидродинамических моделей при участии Сколковского института науки и технологий (Сколтех), Инжинирингового центра МФТИ по полезным ископаемым (ИЦ МФТИ), фонда «НИР» (Инопрактика), МГУ им. Ломоносова, Томского политехнического университета, университета Heriot-Watt (Шотландия) и ООО «Газпромнефть НТЦ», 21 Октября 2019, г. Москва; XVII европейская конференция по математическим основам добычи нефти (EAGE ESMOR XVII), 14-17 сентября 2020, г. Эдинбург; XII Международная интернет-конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (InnoTech 2020), 16-31 декабря 2020, г. Пермь; XXV Международный научный симпозиум имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», 5-9 апреля 2021, г. Томск.

**Публикации по теме диссертации.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 16 работ, в том числе 5 статей в журналах из перечня ВАК, 3 публикации в научных журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 8 публикаций в материалах международных и всероссийских научных конференций.

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты получены автором лично. Автором создана и подготовлена к вычислительным экспериментам синтетическая геолого-гидродинамическая модель месторождения углеводородов. С помощью данной численной модели и вычислительных экспериментов автором изучена степень и характер влияния на эффективность ЦФ ее компонентного состава, способов нормировки и способов взвешивания. Автором разработан и апробирован метод выбора ЦФ для автоадаптации модели месторождения углеводородов. Осуществлено руководство работ по созданию программного продукта, в котором реализован разработанный метод. Постановка цели и задач научного исследования осуществлялась совместно с научным руководителем.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов основной части, заключения, списка литературы и пяти приложений. Полный объем диссертации составляет 141 страницу, включая 78 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 144 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, проводимого в рамках диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации и внедрении полученных результатов.

В **первом разделе** «Обзор существующих подходов к выбору целевой функции для автоадаптации геолого-гидродинамических моделей» приведены теоретические основы адаптации геолого-гидродинамической модели, описана постановка обратной задачи, автоматизация адаптации, роль ЦФ в решении оптимизационной задачи, а также представлен обзор существующих подходов к выбору ЦФ для автоадаптации модели. Рассмотрены и проанализированы

основные особенности подходов, их преимущества и недостатки, а также опыт их применения, описанный в литературе.

Адаптация ГГДМ представляет собой классическую обратную задачу, в которой значения параметров нестационарной трехмерной модели должны быть получены из наблюдаемых данных. Роль параметров модели играют геолого-физические свойства пласта-коллектора, наблюдаемыми данными являются измеренные показатели работы скважин, такие как дебиты, забойные давления и прочие.

Автоматизированная адаптация (автоадаптация) осуществляется с помощью ЦФ и оптимизационного алгоритма. В настоящее время разработаны и используются разные подходы к выбору целевой функции для решения задачи автоадаптации моделей месторождений углеводородов (таблица 1).

Таблица 1 – Существующие подходы к выбору целевой функции

<b>Подход</b> <b>Описание</b>	<b>Однокритериальная</b> <b>оптимизация</b>	<b>Многокритериальная</b> <b>оптимизация</b>
Количество ЦФ	Одна	Несколько
Математическое выражение невязки	Наиболее используемы выражения в виде МНК и СК, единых требований нет	
Настройка влияния целей	За счет весов внутри ЦФ	За счет выбора и группирования ЦФ
Учет погрешности разных типов данных	Возможен посредством нормировки невязок на погрешности измерений	
Преимущества	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Простота,</li> <li>– Гибкость за счет весовых коэффициентов,</li> <li>– Реализован в большинстве программ для ГГДМ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Гибкость за счет свободы выбора целей и их групп,</li> <li>– Не требуются весовые коэффициенты,</li> <li>– Нахождение Парето-оптимальных решений</li> </ul>
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Нет единого подхода к выбору компонентов, способа нормировки, способов взвешивания</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Нет единого подхода к заданию и группированию целей,</li> <li>– Проклятие размерности,</li> <li>– Отсутствует в большинстве программ для ГГДМ</li> </ul>

Как видно из публикаций по существующим подходам к выбору ЦФ, в настоящее время не исчерпана задача создания универсального, единого способа выбора целевой функции, который бы был относительно прост, прозрачен, гибок, практичен с инженерной точки зрения. Учитывая рассмотренные преимущества и недостатки однокритериального и многокритериального подходов, предпочтение в диссертационной работе отдается подходу с единой целевой функцией.

Формула единой (глобальной) ЦФ на основе среднего квадратичного (СК) имеет следующий вид:

$$GOF = \sum_{i=1} \sum_{q=1} w_i w_q \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n w_k \left( \frac{S_{q,i,k} - O_{q,i,k}}{\sigma_{q,i,k}} \right)^2}{\sum_{k=1}^n w_k}}, \quad (1)$$

где,  $GOF$  – глобальная ЦФ,  $S$  – расчетное значение,  $O$  – историческое значение компонента  $q$  идентификатора  $i$  на временном шаге  $k$ ,  $\sigma$  – погрешность измерения величины,  $w$  – весовые коэффициенты,  $n$  – число шагов расчета.

Разность расчетного и исторического значения параметра называется невязкой. Стандартной ЦФ в данной работе обозначается такая ЦФ, в которую входят дебиты нефти и забойные давления по скважинам, погрешности измерений и все виды весовых коэффициентов имеют значение 1 (по умолчанию).

Выбор компонентов ЦФ, способов нормировки и взвешивания невязок для получения наиболее эффективного вида ЦФ для решения задачи автоадаптации являются одними из главных задач настоящего диссертационного исследования.

Во **втором разделе** «Создание и подготовка синтетической геолого-гидродинамической модели к вычислительным экспериментам» описана синтетическая ГГДМ SRM-6, созданная для проведения вычислительных экспериментов с целью изучения влияния вида ЦФ на автоадаптацию. Приведено обоснование выбора параметров адаптации, описан выбранный алгоритм оптимизации (эволюционная стратегия). Описан выбор критериев качества адаптации, продемонстрирована их взаимосвязь с ЦФ. Приведена часть обоснования первого защищаемого положения диссертации. Сформулировано определение эффективности ЦФ для решения задачи адаптации. Описана подготовка модели к расчетам. Построение модели и вычислительные эксперименты выполнялись в программных комплексах Petrel и Eclipse.

В подавляющем большинстве существующих публикаций по автоматизированной адаптации моделей месторождений углеводородов значение ЦФ рассматривается как основной показатель качества адаптации модели. Однако, существует причины, по которым использование численного значения ЦФ как единственного критерия качества адаптации геолого-гидродинамической модели некорректно и необоснованно. Первая причина в том, что в общем случае минимизация значения ЦФ не гарантирует улучшение качества адаптации, то есть модельные показатели работы скважин не обязательно будут становиться все ближе к исторически измеренным данным. Пример подобного случая приводится в разделе 3. Вторая причина связана с интегральным характером ЦФ, которая характеризует лишь суммарное расхождение. При экспертизе адаптированных моделей на практике, как правило, для разных показателей работы скважин и разработки месторождения в целом применяются разные уровни допустимых отклонений. На рисунке 1 показано распределение численных значений ЦФ для 600 расчетов модели, полученных в результате адаптации с применением алгоритма оптимизации. Полученные модели разделены на 2 группы. В одной



группе адаптация считается качественной (зеленая кривая), в другой некачественной (красная кривая). Критериями качества служат допустимые отклонения в показателях работы скважин и месторождения, продиктованных отраслевыми стандартами и принятые в нефтяной компании. Пересечение кривых говорит о том, что при классификации моделей только по ЦФ, неизбежны ложноположительные и ложноотрицательные выводы относительно качества адаптации.

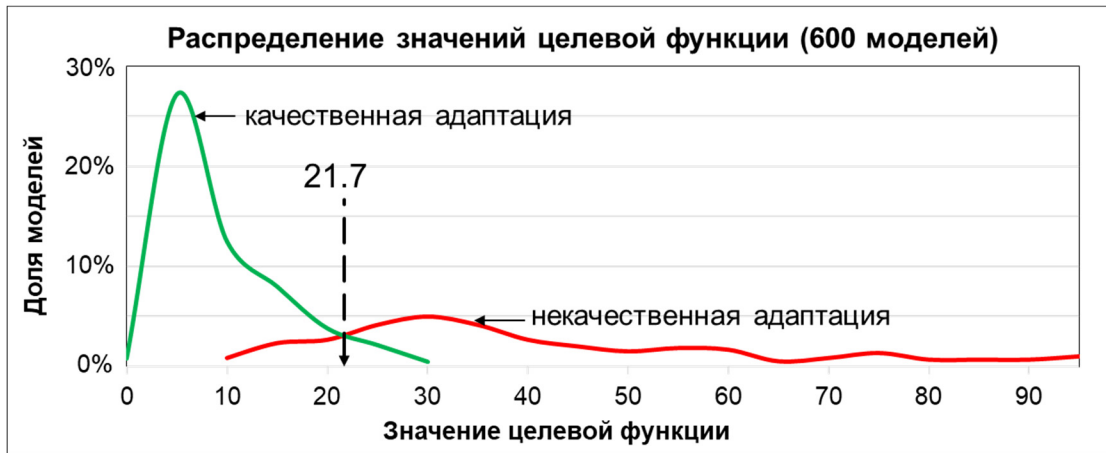


Рисунок 1 – Распределение значений ЦФ по результатам автоадаптации

Третья причина связана с формализацией в области применения геолого-гидродинамических моделей в нефтегазовой промышленности. Нефтяная компания может иметь собственный набор критериев качества адаптации ГГДМ либо сослаться на существующие отраслевые регламенты. Дело в том, что подобный набор критериев по допустимым расхождениям не связан напрямую математически с численным значением ЦФ. Таким образом, минимизировав значение ЦФ, невозможно утверждать об удовлетворительном качестве адаптации без введения конкретного набора критериев качества адаптации, принятого в компании или государственном органе, принимающем ГГДМ месторождения.

Для сравнения результатов вычислительных экспериментов в настоящей работе используются критерии качества адаптации ООО «Газпромнефть НТЦ».

Наиболее эффективной называется та ЦФ, которая позволяет обеспечить удовлетворение набора критериев качества адаптации при минимальных вычислительных затратах.

В третьем разделе «Метод выбора наиболее эффективного вида целевой функции» решены две основные задачи диссертационного исследования. Сначала была изучена степень и характер влияния на эффективность ЦФ ее математического выражения невязки, компонентного состава, способов нормировки и способов взвешивания. Затем определен наиболее эффективный вид ЦФ в зависимости от задачи адаптации и исходных данных. Данные задачи решены посредством методов анализа и численного моделирования на основе созданной синтетической модели SRM-6.

Для математического выражения невязки подавляющее большинство работ по автоадаптации успешно используют среднее квадратичное (СК) либо отклонение по методу наименьших квадратов (МНК). По причине большей устойчивости к выбросам в сравнении с МНК, а также по результатам

дополнительных численных экспериментов, предпочтение в настоящем исследовании отдается выражению ЦФ в виде СК.

Алгоритм расчета ЦФ в виде СК выглядит следующим образом:

1. Получить результаты расчета модели из гидродинамического симулятора и соответствующие им исторические показатели, которые будут участвовать в расчете заданной ЦФ. Например, дебиты нефти по скважине, забойные давления и прочие по ключевым словам. Шаг данных – ежемесячно.

2. Рассчитать невязку между каждой расчетной и исторической точкой данных путем расчета разности величин.

3. Рассчитать нормированную невязку по одному из двух заранее задаваемых вариантов (формулы 2 и 3).

$$\Delta_k = \frac{S_{q,i,k} - O_{q,i,k}}{\sigma_{q,i,k}}, \quad (2)$$

$$\Delta_k = \frac{S_{q,i,k} - O_{q,i,k}}{O_{q,i,k}}, \quad (3)$$

где  $\Delta_k$  – нормированная невязка,  $S_{q,i,k}$  – расчетное и  $O_{q,i,k}$  историческое значение компонента  $q$  (например, дебит нефти) идентификатора  $i$  (например, скважины  $PI$  или группы скважин) на временном шаге  $k$ ,  $\sigma$  – погрешность измерения величины.

Формула 2 нормирует невязки на погрешности измерения, формула 3 нормирует на историческое значение величин.

4. Рассчитать суммарное СК для каждого идентификатора и компонента:

$$m(i, q) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n w_k \Delta_k^2}{\sum_{k=1}^n w_k}}, \quad (4)$$

где  $m(i, q)$  – суммарное СК для каждого идентификатора  $i$  и компонента  $q$ ,  $w_k$  – весовые коэффициенты для временных шагов  $k$ , начиная с момента запуска скважины (начала появления данных),  $n$  – число шагов.

5. Рассчитать частные ЦФ для каждого компонента по формуле:

$$POF(q) = w_q \sum_{i=1} w_i m(i, q), \quad (5)$$

где  $POF(q)$  – частная ЦФ (ЧЦФ) по компоненту  $q$ ,  $w_q$  – весовые коэффициенты для компонентов,  $w_i$  – весовые коэффициенты для идентификаторов.

6. Рассчитать глобальную ЦФ по формулам 6 или 7:

$$GOF = \sum_{q=1} POF(q), \quad (6)$$

$$GOF = \sum_{i=1} \sum_{q=1} w_i w_q m(i, q), \quad (7)$$

где  $GOF$  – глобальная ЦФ.

В итоге получаем общий вид формулы для расчета ЦФ:

$$GOF = \sum_{i=1} \sum_{q=1} w_i w_q \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n w_k \left( \frac{S_{q,i,k} - O_{q,i,k}}{\sigma_{q,i,k}} \right)^2}{\sum_{k=1}^n w_k}}, \quad (8)$$

В коммерческих гидродинамических симуляторах с возможностью автоадаптации расчет ЦФ автоматизирован. Тем не менее, пользователю необходимо выбрать компоненты, способ нормировки и весовые коэффициенты для ЦФ, прежде чем переходить к процессу оптимизации. Изучение характера и степени влияния перечисленных настроек ЦФ на ее эффективность для задачи адаптации является одной из главных задач настоящего исследования.

Выбор компонентов, входящих в ЦФ, должен опираться на уравнение фильтрации флюида в пористой среде. Компонентный состав ЦФ должен однозначно обеспечивать исторические дебиты, приемистости и перепады давлений. В настоящей диссертационной работе рекомендуется использование следующего набора компонентов:

- Текущие дебиты и приемистости по всем типам флюидов;
- Забойные и пластовые (по ГДИС) давления по скважинам.

Использование текущих показателей позволяет избежать накопленные погрешности, которые присущи накопленным показателям работы скважин.

Включение обводненности в ЦФ нежелательно, поскольку этот показатель является производной величиной и содержит комбинированную погрешность, исходящую из измерений дебитов. Воспроизведение показателей по скважинам гарантирует воспроизведение показателей по месторождению. Обратное утверждение справедливо не всегда. Кроме того, использование показателей по скважинам придает ЦФ гибкость, делая возможным применение весовых коэффициентов к скважинам.

Алгоритм расчета ЦФ включает в себя нормировку невязок. Основными способами нормировки являются нормировка на погрешность измерения или на историческое значение. Нормировка на погрешности измерений позволяет задавать разный уровень точности для разных компонентов ЦФ. Нормировка на историческое значение вносит вклад в ЦФ пропорционально относительному расхождению расчета от истории. С одной стороны, такой вариант нормировки может быть удобнее. Однако, в ходе настоящего исследования проявился существенный недостаток нормировки на историческое значение.

В синтетической модели произведена имитация заколонного перетока в добывающей скважине *P2* в период с сентября по ноябрь 2011 года, при котором произошел резкий рост обводненности до 99.9% и соответствующее этому падение дебита нефти (рисунок 2). Значение ЦФ в ходе адаптации уменьшалось, как и положено при оптимизации. Однако, как показали результаты, на шагах расчета, где историческое значение на порядки меньше расчетного, происходит большой вклад в ЦФ величиной 155000 за счёт деления на малую величину по истории. Данный эффект приводит к тому, что оптимизационный алгоритм, пытаясь минимизировать значение ЦФ, игнорирует адаптацию на других участках, где отсутствует описанный эффект. Вследствие этого качественная адаптация становится недостижимой. В связи с описанным эффектом рекомендуется использовать нормировку на погрешности измерения. Полученный вывод является одним из важнейших в диссертационном исследовании. Таким образом, рекомендуется задавать погрешности измерения для компонентов целевой функции на основе физического и инженерного

понимания, а именно с учетом погрешностей, присущих получению используемых исторических данных.

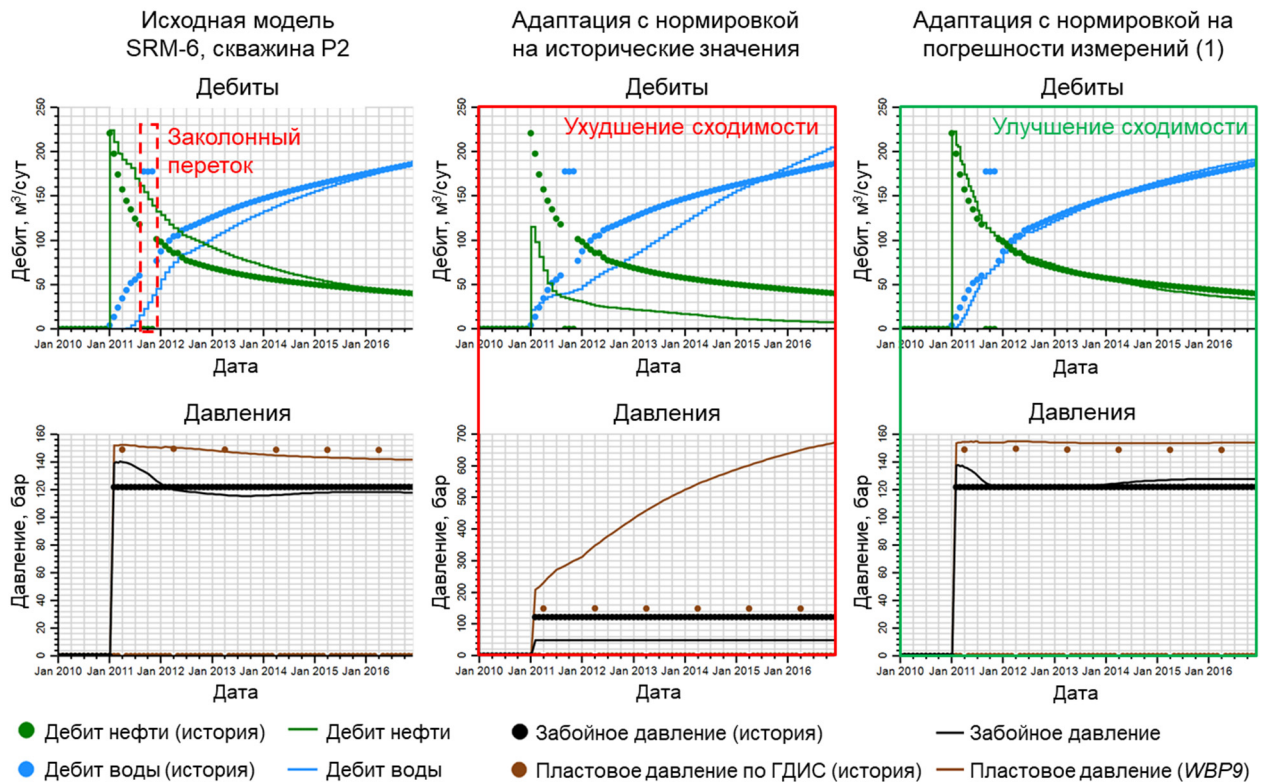


Рисунок 2 – Сравнение результатов адаптации при разных нормировках ЦФ

Весовые коэффициенты позволяют задать разную степень влияния составляющих ЦФ на ее итоговое значение. В большинстве современных коммерческих программ для геолого-гидродинамического моделирования с возможностью автоадаптации реализована возможность задавать следующие виды весовых коэффициентов: для объектов или идентификаторов, для компонентов и для временных шагов. Рассмотрим роль каждого вида весовых коэффициентов, причины и условия их применения, а также степень и характер их влияния на эффективность ЦФ в достижении качественной адаптации.

Весовые коэффициенты для идентификатора умножаются на сумму невязок по идентификаторам, которыми могут быть скважины, группы скважин либо месторождение в целом. В первом случае понижающий вес для скважины целесообразно применить, если качество замеров всех показателей работы скважины в целом вызывают у инженера сомнения. Другой причиной применения весовых коэффициентов для идентификатора, может быть стремление акцентировать ЦФ на адаптацию в зоне интереса. Чем дальше от зоны интереса расположены скважины, тем меньший вклад они будут вносить в численное значение ЦФ. Таким образом, появляется возможность сфокусировать процесс адаптации локально, например, на минимизации невязок в окрестности планируемого бурения.

Весовые коэффициенты для компонентов умножаются на сумму невязок по компонентам ЦФ, которыми могут быть дебит нефти, дебит воды, забойное давление и прочие показатели работы скважин и месторождения. При адаптации модели величины входящих в ЦФ компонентов могут значительно различаться,

тем самым смещая фокус адаптации на компоненты с большими численными значениями. На основе исторических данных по средним значениям дебита нефти, забойных и пластовых давлений в окрестностях добывающих и нагнетательных скважин рассчитаны весовые коэффициенты для компонентов давлений обратно пропорционально их превышению над значением среднего дебита нефти. Балансировка потенциальных вкладов компонентов в ЦФ для адаптации SRM-6 привела к улучшению адаптации по дебитам нефти, уменьшив отклонение по накопленной добыче нефти с 4.63% до 0.07%. При этом сходимость по забойным давлениям сохранилась. Кроме того, весовые коэффициенты для компонентов дают возможность учесть наличие приоритетов в адаптации выбранных пользователем компонентов ЦФ.

В процессе разработки месторождения возможно изменение достоверности либо точности определенных измерений. В этом случае обосновано применение разных весов для временных шагов расчета. Другой причиной применения разных весов для временных шагов является наличие приоритета на адаптацию позднего периода работы скважин, что позволяет получать более достоверный прогноз текущего тренда работы скважин. Применение повышающего коэффициента на последние годы либо месяцы работы скважин приводит к более качественной адаптации позднего периода разработки.

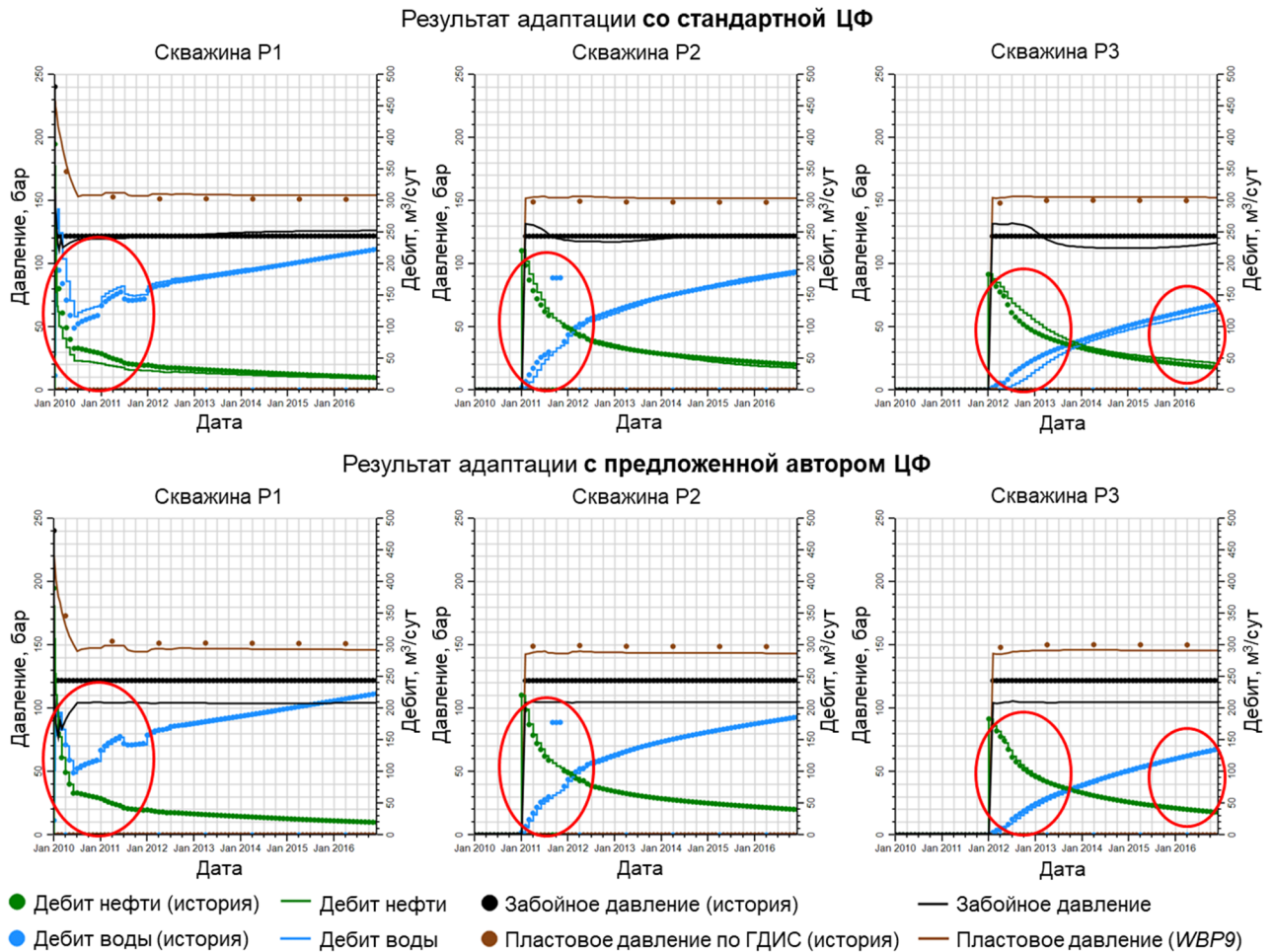
Для получения описанных результатов было проведено около 40 тысяч расчетов модели. На рисунке 3 показана сводная схема метода выбора наиболее эффективного вида ЦФ для автоадаптации, которая является одним из наиболее существенных результатов проведенного исследования.



Рисунок 3 – Схем метода выбора наиболее эффективного вида ЦФ для автоадаптации геолого-гидродинамической модели

Изучение способов взвешивания дало важнейшие результаты по влиянию на эффективность ЦФ для автоадаптации. Применение описанных весовых коэффициентов способно существенно ускорить процесс автоадаптации и улучшить качество полученных результатов. Разные виды весовых коэффициентов обеспечивают гибкость ЦФ, позволяют приспособить ее к разным исходным данным и поставленным задачам адаптации.

После изучения и обоснования аспектов формулировки вида ЦФ, был проведен расчет 300 итераций для сравнения адаптации с использованием стандартной ЦФ и ЦФ, полученной в соответствии с разработанным методом (далее по тексту «предложенная ЦФ»). (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Сравнение результатов адаптации модели SRM-6 с использованием стандартной ЦФ и предложенной автором**

Применение разработанного метода позволило найти решения с полным совпадением расчетных и исторических дебитов и приемистостей скважин. Стоит отметить, что при этом забойные давления остаются в пределах заданной погрешности измерений для давлений. Несмотря на то, что на некоторых приведенных графиках показателей работы скважин различие может показаться недостаточно существенным, в масштабах модели со множеством скважин эффект будет суммироваться, приводя к значительной разнице в качестве адаптации.

По результатам численных экспериментов сделаны выводы относительно наиболее эффективного вида целевой функции в зависимости от задачи адаптации

и исходных данных. Обобщен и сформулирован в виде схемы метод выбора целевой функции для автоадаптации геолого-гидродинамической модели месторождения углеводородов. Осуществлена программная реализация метода для повышения ее практической ценности и потенциала широкого внедрения. Разработанный метод является целью настоящего диссертационного исследования. Полученная схема метода и программа являются одними из наиболее существенных результатов проведенного исследования.

Во **четвертом разделе** «Применение разработанного метода на модели реального месторождения углеводородов» приведены результаты апробации разработанного метода выбора ЦФ для решения задачи автоадаптации на секторной модели реального нефтяного месторождения, расположенного на территории Омской области.

Сектор модели реального месторождения включает в себя 49 скважин, разрабатывается методом заводнения с 16 годами истории. В качестве параметров адаптации используются 20 переменных, включающих в себя петрофизические, структурные и прочие геологические неопределенности.

Для апробации метода было рассчитано по 200 итераций с использованием стандартной ЦФ и предложенной автором. Обе ЦФ задавались таким же образом, как для численных экспериментов с синтетической моделью. Единственным общим отличием является отсутствие компонента пластового давления по ГДИС. Поскольку в рассматриваемой модели отсутствует активный аквифер, отсутствие пластовых давлений не должно стать препятствием к успешной автоадаптации.

На рисунке 5 показаны невязки по дебитам и приемистостям лучших моделей по результатам адаптации. Невязки, полученные с применением разработанного метода, уменьшились в среднем в 2 раза по сравнению с адаптацией с использованием стандартной ЦФ. Утверждение справедливо как в отношении дебитов нефти и воды, так и приемистости воды.

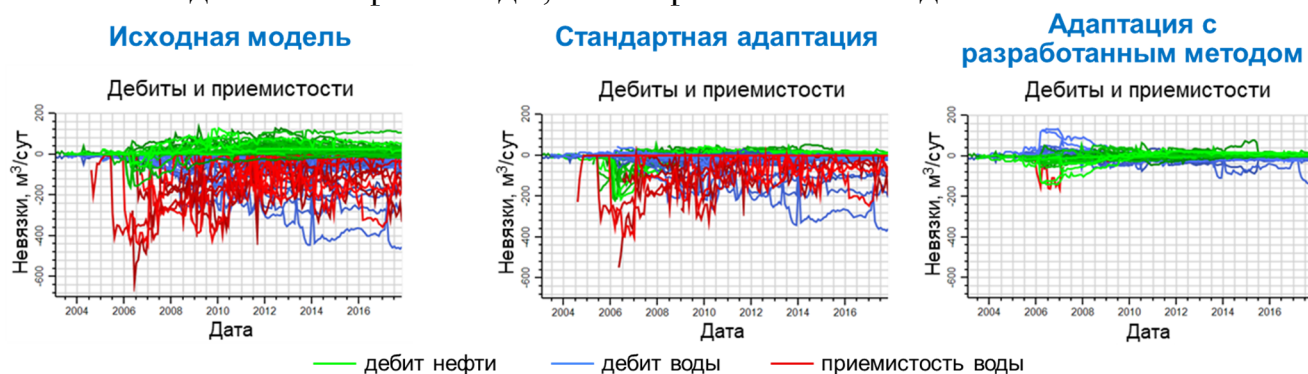


Рисунок 5 – Сравнение невязок по результатам адаптации модели реального месторождения со стандартной ЦФ и предложенной автором

Наиболее полное и объективное сравнение результатов адаптации со стандартной целевой функцией и предложенной автором возможно провести с помощью сопоставления динамики основных показателей разработки месторождения. Инженер-разработчик в первую очередь смотрит на то, насколько хорошо сходятся графики по добыче, закачке и давлениям.

На рисунке 5 приведены результаты адаптации модели реального месторождения.

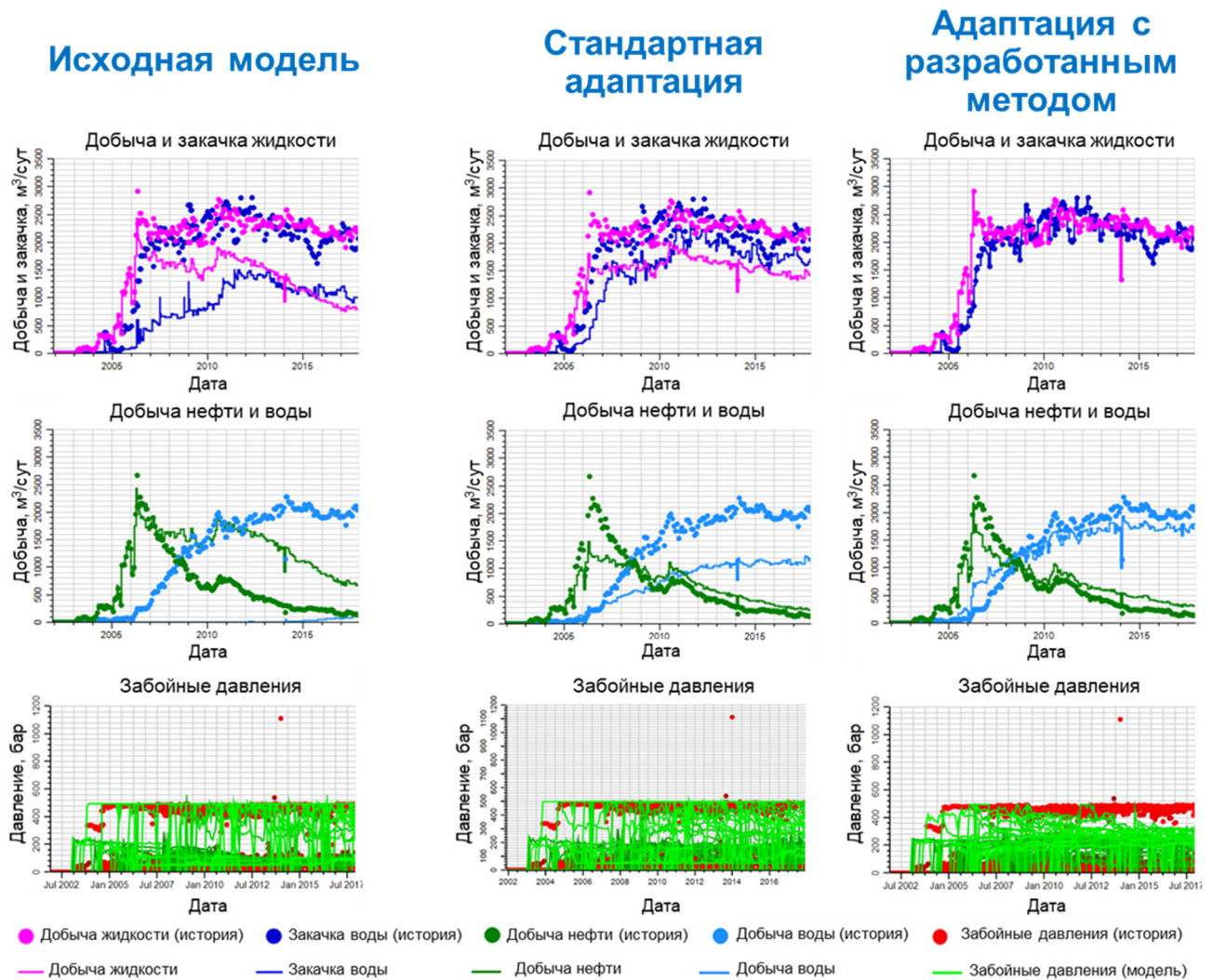


Рисунок 6 – Сравнение показателей разработки по результатам адаптации модели реального месторождения со стандартной ЦФ и предложенной автором

В модели, полученной с использованием предложенной автором ЦФ, добыча и закачка флюида воспроизводится почти полностью, обеспечивая материальный баланс. Отклонение по накопленной добыче и закачке жидкости с применением метода не превышают 1%, в то время как со стандартной ЦФ данные отклонения равны 29% и 22% соответственно. Показатели по добычи нефти и воды при использовании метода так же существенно лучше воспроизводятся по сравнению с адаптацией со стандартной ЦФ. Максимальное отклонение месячной добычи нефти при использовании метода составляет 530 м<sup>3</sup>/сут, со стандартной ЦФ 1165 м<sup>3</sup>/сут, максимальное отклонение закачки воды с методом 161 м<sup>3</sup>/сут, со стандартной ЦФ 1132 м<sup>3</sup>/сут. Таким образом, качество и скорость адаптации при использовании разработанного метода выбора ЦФ существенно превзошли результаты оптимизации со стандартной формулировкой ЦФ. Выводы, полученные с помощью численных экспериментов на синтетической модели SRM-6, подтвердились при адаптации реальной модели с использованием предложенного метода.

Достоверность выводов и применимость метода позволяет внедрить разработку в широкую практику для автоматизированной адаптации геолого-гидродинамических моделей месторождений углеводородов.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена задача создания метода выбора наиболее эффективного вида ЦФ для осуществления автоматизированной адаптации геолого-гидродинамических моделей месторождений углеводородов.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Проведен аналитический обзор существующих подходов к заданию целевой функции для автоадаптации моделей. Были описаны и проанализированы основные особенности подходов, их преимущества и недостатки, а также опыт их применения, описанный в литературе. На основе публикаций был сделан вывод об отсутствии единого стандартизованного подхода или метода для задания вида целевой функции, которая бы обеспечивала достижение задач адаптации с наименьшими вычислительными затратами.
2. Предложено и научно обосновано определение эффективности целевой функции, заключающееся в способности адаптированной геолого-гидродинамической модели достигать заданных значений набора критериев качества адаптации месторождения углеводородов при минимальных вычислительных затратах.
3. Разработана синтетическая геолого-гидродинамическая модель, на основе которой установлены степень и характер влияния на эффективность целевой функции математического выражения невязки, ее компонентного состава, способов нормирования и взвешивания невязок.
4. Разработан, теоретически и экспериментально исследован и апробирован на реальных данных метод выбора наиболее эффективной целевой функции для автоадаптации геолого-гидродинамической модели месторождения углеводородов.

Результаты диссертационной работы используются в ходе выполнения научно-исследовательских работ, внедрены в деятельность Центра компетенций по гидродинамическому моделированию ООО «Газпромнефть НТЦ», а также в учебный процесс ТПУ. Получены соответствующие акты о внедрении. Получен патент на изобретение «Способ адаптации геолого-гидродинамической модели пласта», в котором описан разработанный в ходе диссертации метод. Выполнена программная реализация разработанного метода, а также создана программа для оценки качества адаптации геолого-гидродинамических моделей месторождений углеводородов. Построенная автором синтетическая модель SRM-6 выложена в свободный доступ в сети интернет для учебных и научно-исследовательских целей.

**ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Еремян Г.А. Геологически обоснованная автоматизированная адаптация гидродинамических моделей на примере реального месторождения / Шишаев Г.Ю., Матвеев И.В., Еремян Г.А., Демьянов В.В., Кайгородов С.В. // Нефтяное хозяйство. – 2020. – №6. – С.58-61. (**Scopus**).
2. Еремян Г.А. Критерии качества автоматизированной адаптации геолого-гидродинамической модели месторождения углеводородов / Еремян Г.А., Рукавишников В.С. // Экспозиция Нефть Газ. 2020. № 6. С. 76–79.
3. Еремян Г.А. Выбор математического выражения и компонентного состава целевой функции для автоматизированной адаптации геолого-гидродинамических моделей / Еремян Г.А., Рукавишников В.С. // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2021. №1. С. 55-61.
4. Еремян Г.А. Влияние способов нормировки целевой функции на результаты автоадаптации численной модели месторождения углеводородов / Еремян Г.А., Рукавишников В.С. // Экспозиция Нефть Газ. 2020. № 6. С. 81–86.
5. Еремян Г.А. Влияние способов взвешивания целевой функции на эффективность автоадаптации численной модели месторождения углеводородов // Нефтепромысловое дело. 2021. №1. С. 33-40.
6. Еремян Г.А. Методика выбора оптимальной целевой функции для автоадаптации геолого-гидродинамической модели // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2021. №1. С. 30-38.
7. Еремян Г.А. Комплексный подход к параметризации геолого-гидродинамической модели для её автоадаптации к процессам разработки залежей нефти / Еремян Г.А., Давуди Ш., Рукавишников В.С., Степико А.С. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332., – № 5. – С.138–147. (**Scopus, WoS**).
8. Еремян Г.А. Сравнительный анализ физических свойств и экономической эффективности буровых растворов с нанодобавками / Давуди Ш., Еремян Г.А., Степико А.В., Рукавишников В.С., Минаев К.М. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332., – № 6. – С.130–141. (**Scopus, WoS**).

*Патент и свидетельства о государственной регистрации*

9. Патент на изобретение №2754741. Способ адаптации геолого-гидродинамической модели пласта / Кайгородов С.В., Рукавишников В.С., Демьянов В.В., Шишаев Г.Ю., Матвеев И.В., Еремян Г.А. // Опубл. 07.09.2021, Бюл. №25. Заявка №2021106489 от 2021.03.12; Решение о выдаче патента от 05.08.2021.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021668790 (RU); Заявка № 2021668790 от 16.11.2021, дата рег. 19.11.2021; Бюл. № 11 // Еремян Г.А. Программа для генерации оптимальных параметров целевой функции для автоадаптации цифровых моделей месторождений углеводородов «Objective function».

11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021680049 (RU); Заявка № 2021668878 от 22.11.2021, дата рег. 07.12.2021; Бюл. № 12 // Еремян Г.А., Рукавишников В.С. Программа для оценки качества адаптации цифровых моделей месторождений углеводородов «HM Quality».

*Статьи в других изданиях*

12. Eremyan G.A. Geology Driven History Matching / Matveev I.V., Shishaev G.Y., Eremyan G.A. et al // SPE-196881-MS. – 2019. (**Scopus**).
13. Eremyan G. How does the definition of the objective function influence the outcome of history matching? / Eremyan G., Matveev I., Shishaev G., Rukavishnikov V., Demyanov V. // Conference Proceedings, XVII European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR XVII), Sep 2020, V. 2020, p.1 – 14. (**Scopus**).
14. Eremyan G. Geology realism control in automated history matching / Matveev I., Shishaev G., Eremyan G., Konoshonkin D., Demyanov V., Kaygorodov S. // Conference Proceedings, XVII European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR XVII), Sep 2020, Volume 2020, p.1 – 3. (**Scopus**).
15. Eremyan G. An optimization method for the assisted history matching (AHM) process using the gradient boosting approach / Melnikov M., Shishaev G., Matveev I., Eremyan G., Demyanov V., Bukhanov N., Belozarov B. // Proceedings of EAGE/AAPG Digital Subsurface for Asia Pacific Conference, Sep 2020, Volume 2020, p.1 – 9. (**Scopus**).
16. Еремян Г.А. Создание синтетической модели залежи углеводородов для изучения эффективности целевой функции при автоадаптации // Материалы XII Международной интернет-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика». – 2021.– С. 138-143.
17. Еремян Г.А. Анализ подходов к выбору целевой функции для автоматизированной адаптации моделей месторождений углеводородов // Материалы XII Международной интернет-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика». – 2021.– С. 144-149.
18. Еремян Г.А. Влияние математического выражения невязки целевой функции на эффективность автоадаптации геолого-гидродинамической модели // Усовка 2021 // Труды XXV Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – 2021. – Т. 2. – С. 69-70.
19. Еремян Г.А. Сравнительный анализ влияния способов нормировки целевой функции на результат автоадаптации геолого-гидродинамической модели // Усовка 2021 // Труды XXV Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – 2021. – Т. 2. – С. 71-72.