

*На правах рукописи*



**АСТАФЬЕВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ**

**ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
МНОГОЗОННОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА  
НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРОВ**

1.6.9 – геофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН, а также в Обществе с ограниченной ответственностью «БурСервис»

**Научный руководитель:**

**Митрофанов Георгий Михайлович**

доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики ИНГГ СО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Салимов Олег Вячеславович**

доктор технических наук, менеджер управления научно-технического развития, ООО «Тюменский нефтяной научный центр» (г. Тюмень)

**Патутин Андрей Владимирович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН (г. Новосибирск)

**Ведущая организация:**

Общество с ограниченной ответственностью  
«РН-БашНИПИнефть» (г. Уфа)

Защита состоится 26 марта 2025 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:

просп. Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090;

факс: (383) 333-25-13, 330-28-07;

e-mail: [NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru](mailto:NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/astafiev2024>

Автореферат разослан 14 февраля 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д.Г.-М.Н., доцент

Неведрова  
Нина  
Николаевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Объект исследования** – многозонный гидравлический разрыв пласта (МГРП).

Гидроразрыв пласта является одной из наиболее эффективных технологий повышения продуктивности скважин. В современных условиях около 70% запасов углеводородов в России относятся к трудноизвлекаемым, а их разработка зачастую нерентабельна даже наклонно-направленными скважинами с ГРП и требуется строительство горизонтальных скважин с многозонной стимуляцией пласта. Хотя метод многозонного гидроразрыва пласта получил достаточное развитие за последние годы [6], его применение для таких месторождений требует более корректного подхода к моделированию, производству и оценке гидроразрыва.

### **Актуальность.**

Эффективность разработки месторождений многозонными ГРП во многом определяется оптимальностью созданных трещин гидроразрыва и оптимальностью конструкции скважин. Стимуляция низкопроницаемых коллекторов предполагает максимизацию зоны дренирования путем создания нескольких трещин с большой геометрией и высокими фильтрационными параметрами. Азимуты и геометрия трещин МГРП, их пространственное расположение и фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) во многом определяют эффективность дренирования коллектора, и оптимизация этих параметров является важнейшей задачей при моделировании МГРП. Воздействие гидроразрыва на низкопроницаемый коллектор может создавать водные экраны, вызывать набухание глин, кольтатировать притрещинную зону пласта, образовывать эмульсии, что оказывает значительное ухудшение ФЕС пластов. Эти процессы являются важным фактором и должны учитываться при моделировании, проектировании и производстве гидроразрыва. Моделирование МГРП в данном случае определяет процессы проектирования и строительства скважин, технологии контроля интенсификации и добычи углеводородов, системы разработки месторождений.

Развитие методики интегрированного проектирования МГРП на основе трехмерных моделей, построенных на комплексировании геофизических, геологических, геомеханических и геохимических моделей, является актуальной задачей на всех стадиях разработки низкопроницаемых коллекторов, что и определило цель данной работы.

**Цель исследования** – повышение эффективности извлечения углеводородов из низкопроницаемых коллекторов с использованием многозонного гидравлического разрыва пласта.

**Научная задача** – разработать интегрированный подход к проектированию многозонного гидроразрыва пласта, состоящий из усовершенствованной методики моделирования и методики автоматизированной оптимизации МГРП, обеспечивающий создание новых технологий МГРП низкопроницаемых коллекторов.

**Этапы решения задачи:**

1. Развитие методики моделирования многозонного гидроразрыва пласта на основании петрофизической, геохимической и трехмерных геологической, геомеханической, гидродинамической моделей пластов.

2. Создание методики оптимизации МГРП с учетом ФЕС и структурных особенностей пласта, позволяющей отказаться от моделирования трещин ГРП с различными параметрами и их импортирования в гидродинамическую модель для поиска оптимального варианта.

3. Разработка подхода к проектированию многозонного гидроразрыва пласта.

4. Экспериментальная проверка подхода и методик проектирования многозонного гидроразрыва пласта.

**Защищаемые научные результаты:**

1. На основе интеграции трехмерных геомеханических, геологических и гидродинамических моделей и одномерных петрофизических и литолого-геохимических моделей усовершенствована методика моделирования многозонного гидроразрыва низкопроницаемых пластов.

2. Создана методика автоматизированной оптимизации многозонного гидроразрыва на основе анализа продуктивности скважины с использованием многовариантных расчетов в гидродинамической модели пласта.

**Научная новизна.**

Предложен и реализован новый подход к проектированию многозонного гидроразрыва низкопроницаемых пластов на основе разработанных методик трехмерного моделирования и автоматизированной оптимизации МГРП:

1. Показано, что основой для моделирования многозонного гидроразрыва низкопроницаемых пластов должны быть взаимосвязанные трехмерные геомеханические, геологические и гидродинамические модели пластов и одномерные петрофизические и литолого-геохимические модели пластов.

2. Показано, что применение в методике моделирования гидроразрыва обратной связи параметров МГРП, полученных по данным геофизических исследований в скважинах и по сопоставлению

модельных и фактических данных обработок МГРП, с параметрами входных трехмерных моделей пласта позволяет скорректировать не только модели гидроразрыва, но и параметры исходных геологических, гидродинамических и геомеханических моделей пластов.

3. Разработаны методические основы автоматизированной оптимизации многозонного гидроразрыва при помощи интеграции данных геофизических исследований скважин, моделирования ГРП и гидродинамического моделирования для низкопроницаемых пластов.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Предложенный подход к проектированию многозонного гидроразрыва пласта позволяет оптимизировать процесс проектирования МГРП, используя интеграцию трехмерных моделей пласта и псевдотрехмерных или планарных трехмерных моделей трещин гидроразрыва, что существенно повышает корректность проектирования.

Переработаны методические приемы моделирования МГРП для низкопроницаемых коллекторов с учетом данных трехмерных геологических, геомеханических, гидродинамических, одномерных геофизических и литолого-геохимических моделей, что позволяет существенно уточнять модели гидроразрыва на стадии проектирования. Создание в методике моделирования обратных связей между моделью МГРП, откалиброванной по данным геофизических исследований в скважинах, с входными трехмерными моделями позволяет скорректировать не только модели гидроразрыва, но и параметры исходных геологических, гидродинамических и геомеханических моделей.

Показана возможность моделирования многозонного ГРП и его совершенствования с использованием стандартной и усовершенствованной методик оптимизации МГРП. Определены их отличия и применимость при проектировании МГРП.

На основе разработанного подхода построены модели и проведены первые в России МГРП с жидкостью на углеводородной основе на низкотемпературных газовых пластах туронского яруса.

С использованием разработанного подхода проведены исследования скважин, спроектированы и проведены многозонные обработки высокотемпературных нефтяных пластов, на основе которых построены модели и проведены первые в России высокоскоростные МГРП тюменской свиты, ставшие основой для технологии разработки нетрадиционных запасов баженовской свиты.

#### **Методология и методы диссертационного исследования.**

Для решения задач диссертационной работы использовались методы моделирования процесса ГРП, трехмерного гидродинамического

и геомеханического моделирования пласта, методы ГИС. Проводился анализ геолого-геофизических свойств низкопроницаемых пластов и построение петрофизических моделей. По данным ГИС и исследованиям геомеханических свойств керна создавались 1-D и 3-D геомеханические модели пластов с использованием современных геомеханических симуляторов. Выполнялось экспериментальное исследование взаимодействия жидкости ГРП с породами и пластовыми флюидами, создавались рецептуры жидкостей ГРП, определялись параметры изменения ФЕС пластов при воздействии жидкости гидроразрыва. Выполнялось построение 3D гидродинамических моделей, учитывающие влияние процесса гидроразрыва на изменение ФЕС пласта, с трещинами МГРП для оптимизации дизайнов гидроразрыва.

#### **Достоверность полученных результатов и выводов.**

Достоверность результатов работы обеспечена использованием широко апробированных методик экспериментальных исследований и современного программного обеспечения. Построение моделей ГРП, их перенос и апробация в трехмерные модели МГРП и трехмерные гидродинамические модели выполнены на современных программных симуляторах с использованием современных методик моделирования.

Достоверность подтверждается использованием предложенного подхода и разработанных методик при планировании и проведении многозонного ГРП на двух месторождениях. С использованием предложенного подхода разработаны технологии МГРП на основе углеводородных гелей и технологии МГРП на основе водных систем. Выполненные работы продемонстрировали высокую степень соответствия результатов моделирования с экспериментальными данными, что подтверждается скважинными геофизическими и гидродинамическими исследованиями. Кроме того, была существенно повышена эффективность добычи углеводородов из целевых пластов, что подтверждается результатами добычи и гидродинамическими исследованиями скважин.

Прикладные возможности подхода и методик были представлены и защищены на НТС в компаниях Севернефтегазпром, Роснефть, Газпромнефть. Материалы работы представлены на крупнейших международных и российских научно-технических конференциях, семинарах и форумах.

#### **Личный вклад:**

1. Автором усовершенствована и опробована методика моделирования ГРП на основе интеграции 1D петрофизической, геохимической и 3D геологических, геомеханических и гидродинамических моделей.

2. Автором совместно с А.А. Андреевым разработана и опробована методика автоматизированной оптимизации МГРП.

3. Автором показано, что для корректного проектирования МГРП в низкопроницаемых коллекторах необходим дополнительный комплекс ГИС, исследований кернового материала и жидкостей гидроразрыва.

4. Автором лично на основании методик разработан подход к интегрированному проектированию МГРП в низкопроницаемых коллекторах, реализованный при разработке туронских и юрских отложений.

5. Автор предложил и разработал модели ГРП и МГРП, системы жидкостей ГРП для обработок высокотемпературных и низкотемпературных пластов.

6. Трехмерные геомеханические и гидродинамические модели скорректированы на основании рекомендаций автора, полученных в процессе построения моделей ГРП, проведения лабораторных исследований и пилотных обработок скважин.

7. Модели МГРП получены автором лично в процессе подготовки и проведения пилотных работ, анализе результатов экспериментов и корректировке моделей.

8. Опытно-промышленные многозонные обработки скважин спроектированы на основе интегрированного подхода, проведены при непосредственном участии автора в проектировании, корректировке моделей и проведении экспериментов.

9. Микросейсмический мониторинг МГРП, гидродинамические испытания скважин и трассерные исследования получены специализированными компаниями в силу их специфики, сложности и уникальности, но их проведение планировалось при непосредственном участии автора, а результаты использовались автором для уточнения и корректировки моделей МГРП.

#### **Апробация работы и публикации.**

Вносимые на защиту результаты изложены в 17 публикациях: в 4 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Минобрнауки России для публикации результатов диссертаций (одна статья в журнале К1 и две статьи в журналах К2); в 10 статьях в зарубежных изданиях, включенных в реферативную базу данных Scopus и РИНЦ); в 3 статьях в российских нефтегазовых журналах.

#### **Благодарности.**

Данная работа выполнена в ООО «БУРСЕРВИС», а также в ИНГГ СО РАН под руководством главного научного сотрудника д.ф.-м.н. Г.М. Митрофанова, которому автор выражает искреннее уважение и

благодарность за помощь и поддержку во время подготовки работы. Особую признательность хочется выразить главному геологу ООО «Севернефтегазпром» В.В. Воробьеву и старшему эксперту ООО «Тюменский нефтяной научный центр» М.И. Самойлову за совместную работу при планировании и проведении экспериментов, обсуждении результатов и подготовке публикаций. Автор выражает огромную благодарность коллегам из компаний Halliburton, ИНГГ и БурСервис за плодотворную совместную работу на проектах, ценные советы и помощь в подготовке материалов.

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 119 страниц и содержит 55 рисунков, 15 таблиц, список терминов, список литературы из 119 наименований, список условных обозначений и сокращений.

## **КРАТКОЕ СОДРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект, цель и задача исследования, сформулированы основные полученные результаты, определена их научная новизна и практическая значимость, личный вклад автора.

В главе 1 **«Особенности моделирования, проведения и контроля гидравлического разрыва пласта в низкопроницаемых слоистых коллекторах»**, имеющей обзорный характер, приведена история развития метода ГРП и геофизических методов исследований, являющихся основой для получения данных для построения моделей гидроразрыва, контроля обработок и оценки параметров созданных трещин [4]. Рассмотрены технологии и модели ГРП, современные методы получения данных для моделирования гидроразрыва пласта [2], современные геофизические методы контроля и мониторинга процесса ГРП, методы оптимизации МГРП [5].

На основе анализа теоретических, лабораторных и натурных работ в области ГРП показано, что различие в теоретических подходах относится к основам метода, а скудность информации является серьезной проблемой (В. Астафьев и др., 2022). С момента представления первой математической модели развития трещины в нефтяном пласте Христиановичем и Желтовым в 1955 г. моделирование становится важнейшим методом в ГРП. Т.К. Perkins и L.R. Kern создали новую математическую модель развития трещины ГРП в 1961 г., которую позже доработал R.P. Nordgren (1972) и теперь известна как модель PKN.

Модель Христиановича-Желтова усовершенствовали J. Geertsma и F. de Klerk в 1969 г., и в настоящее время она известна в литературе как модель KGD. Получила дальнейшее развитие и радиальная модель трещины (Daneshy, 1978), которую ранее описал I.N. Sneddon (1945). Накопление опыта и понимание особенностей гидроразрыва при решении различных задач привело к пересмотру существующих 2D моделей, появлению новых псевдотрехмерных, трехмерных планарных и полных трехмерных моделей трещин ГРП (B. Chen et al., 2021; N. Warpinsky et al., 1993; J.D. McLennan et al., 1985). В настоящее время наибольшее распространение получили симуляторы ГРП с псевдотрехмерными и планарными моделями трещины ГРП.

Для проектирования многозонного ГРП необходимо создание наиболее точных моделей нескольких трещин, учет их влияния на изменение свойств пород и вклад каждой трещины в работу скважины, а это требует более точного определения параметров пластов. Стандартные методы ГИС используются для определения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) и литологии разреза, пластовой температуры и давления. Акустические методы ГИС и керновые исследования позволяют определять геолого-геофизические и геомеханические параметры пластов. Испытания керна позволяют определить дополнительные геомеханические параметры и уточнить параметры, полученные методами ГИС. Кроме того, исследования керна позволяют определить параметры фильтрации жидкости ГРП, параметры коркообразования, степень кольтатации пласта продуктами распада геля ГРП или продуктами его взаимодействия с породой и флюидом пласта, что позволяет оценить степень воздействия флюидов на пласт, а также учесть изменения ФЕС пластов в моделировании.

Для определения параметров созданных трещин и корректировки моделей ГРП используются современные геофизические методы - микросейсмический мониторинг, поверхностная или скважинная наклонометрия, широкополосная акустика, импульсный нейтрон-нейтронный каротаж и распределенные оптоволоконные системы [9,12]. Важным этапом в развитии ГРП стала его интеграция с методами гидродинамических исследований скважин (ГДИС) (M. Prats, 1961; H. Cinco-Ley и F. Samaniego-V, 1981). Для оценки дебита горизонтальных скважин разрабатываются аналитические методы (С.В. Елкин и др., 2016) с учетом многих допущений, но наиболее востребованы для оценки эффективности работы скважин с МГРП и выбора оптимальных параметров трещин оптимизационные методы на основе трехмерного гидродинамического моделирования (R. Barree et al., 2015; Б.Н. Старовойтова, С.В. Головин и др., 2019).

В главе 2 «Получение данных и моделирование МГРП» описана усовершенствованная методика моделирования. В отличие от стандартной методики, где моделирование происходит полностью в симуляторе ГРП на основе плоскопараллельной модели пласта с изменением свойств по одному измерению, усовершенствованная методика [3] предполагает использование специализированных симуляторов для построения 3D геологических, геомеханических, гидродинамических и 1D литолого-геохимических и петрофизических моделей, которые являются входными данными для моделирования ГРП (Рисунок 1). Модели взаимосвязаны, что позволяет не только вносить корректировки при создании моделей, но и более качественно контролировать входные данные, получаемые из ГИС или анализа керна и пластового флюида. Трехмерные модели позволяют учесть структуру и свойства геологического пространства до моделирования самого ГРП.

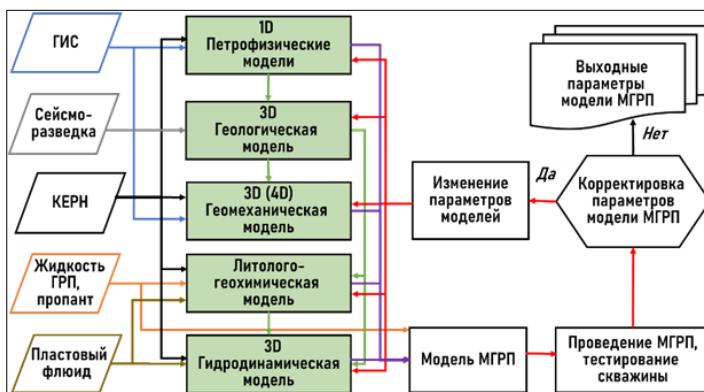


Рисунок 1 – Диаграмма комплексного процесса построения модели ГРП

При использовании полных 3D симуляторов ГРП можно напрямую импортировать трехмерное распределение геологических и геомеханических свойств в модель ГРП, а при использовании псевдо-3D или планар-3D симуляторов эти свойства учитываются при расчете параметров моделируемых трещин. На этапе проведения основного ГРП или тестовых закачек уточненные данные модели гидроразрыва повлияют не только на корректировку тех моделей, данные которых уточнены, но и на все остальные модели пласта из-за их взаимосвязи в общем процессе моделирования ГРП. Создание более точных моделей трещин МГРП, в свою очередь, требует проведение дополнительных исследований и экспериментов для получения наиболее достоверных данных для построения моделей.

В главе 3 «Оптимизация моделей МГРП для низкопроницаемых коллекторов» описана стандартная методика оптимизации МГРП, основанная на импортировании модельных параметров трещин в гидродинамический симулятор и выбор оптимальных параметров конструкции скважины, параметров трещин МГРП, их азимутов, взаимного положения для оценки параметров добычи и экономической эффективности работы скважины. Такая методика достаточно трудозатратна, поэтому в целях совершенствования процесса проектирования МГРП предложена методика автоматизированной оптимизации (Рисунок 2), где оптимизационное решение сводится к предварительной оценке параметров работы скважины с МГРП еще до финального проектирования трещин [1, 7]. Таким образом, оценивая только технологически достижимые параметры трещин, рассчитывается серия моделей с оптимизацией расстояний между трещинами, фильтрационно-емкостных и геометрических параметров трещин. Оптимальные параметры трещин, полученные во время автоматизированной оптимизации, совместно с 3D моделями пластов адаптируются с учетом реальной траектории скважины и системы заканчивания и составляют окончательную модель МГРП, которая используется для прогноза параметров добычи. При проектировании гидроразрыва для скважин туронского яруса использована стандартная методика, а для скважин тюменской свиты – стандартная и автоматизированная методики оптимизации МГРП.

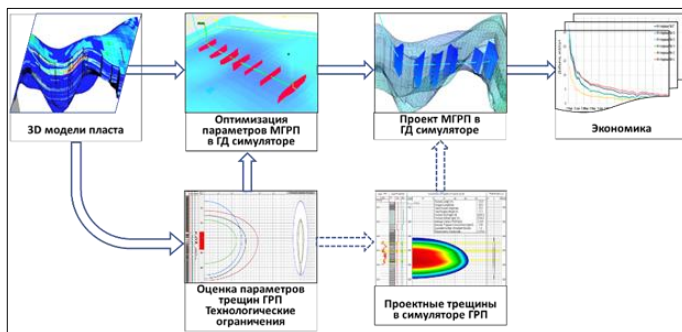


Рисунок 2 – Диаграмма методики автоматизированной оптимизации МГРП

В рамках автоматизированной оптимизации рассчитано 270 реализаций с различными параметрами трещин и расстояний между ними. Оценка достижимых параметров трещин ГРП проведена в симуляторе FracPro, а их оптимизация рассчитывалась в гидродинамическом симуляторе DSFP. Максимальная добыча достигается при максимальных показателях

длины трещины и ее проводимости. Накопленная добыча максимальна при максимальных параметрах и может быть принята за 100 % потенциал скважины. Параметры с максимальной добычей вполне предсказуемы, а параметры моделей с близкими результатами, но гораздо менее затратными на ГРП, наиболее интересны для оптимизации обработок ГРП (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Зависимость добычи от объема закачанного пропанта

При этом стоимость ГРП пропорциональна объему пропанта, а его максимальное количество может быть принято за 100%. Для сценариев с добычей в 90...95 % от максимальной добычи существует более 20 вариантов различных дизайнов, которые существенно отличаются объемом пропанта и, соответственно, стоимостью многозонной обработки. Таким образом, если подходить к вопросу оптимизации МГРП комплексно, рассматривая не только конечный дебит, но и затраты на проведение МГРП, можно подобрать наиболее экономически эффективные варианты.

В главе 4 «**Экспериментальная проверка моделей ГРП и многозонного ГРП**» приведены примеры применения методик моделирования и оптимизации МГРП на низкопроницаемых коллекторах. Для проверки модели и технологии гидроразрыва, разработанной на основе усовершенствованной методики моделирования ГРП, проведена обработка пилотной вертикальной скважины в туронском ярусе с полным анализом обработки, корректировкой модели и оценкой увеличения продуктивности скважины после гидроразрыва [8]. Важно отметить, что геометрия созданной трещины отличается от модельной незначительно, поэтому

стартовые параметры работы скважины после проведенного ГРП не отличаются существенно от параметров, полученных при моделировании. Освоение пилотной скважины туронского яруса после ГРП показало оценочный прирост дебита по газу в 3–5 раз, что подтверждает правильность моделирования и выбор технологии гидроразрыва.

Многозонная обработка горизонтальной скважины туронского яруса включала закачку 4 стадий МГРП по 70 тонн пропанта с жидкостью на углеводородной основе. Учитывая проницаемость пропластков и наличие разлома, интервалы перфорации выбраны в наиболее проницаемых участках целевых пластов, а первый интервал обработки перемещен на внутреннюю сторону разлома для вовлечения трещины в общую систему дренирования горизонтальной скважины. Для определения параметров трещин МГРП и сопоставления фактических и модельных результатов обработки при проведении МГРП выполнялся комплекс микросейсмических исследований. Азимут распространения трещин ГРП составил 135–139° для стадий 2–4 и 100° для первой стадии, на развитие которой оказало влияние присутствие разлома, где трещина первой стадии распространялась в непосредственной близости от него. Несмотря на малую глубину пласта и связанный с этим тензор сжатия, наблюдается вертикальный характер создаваемых трещин. Параметры трещин ГРП, полученные из анализа микросейсмического мониторинга, составили 100 м в длину и 60 м в высоту, что совпадает с анализом обработки методом сопоставления давлений и согласуется с модельными данными (Рисунок 4).

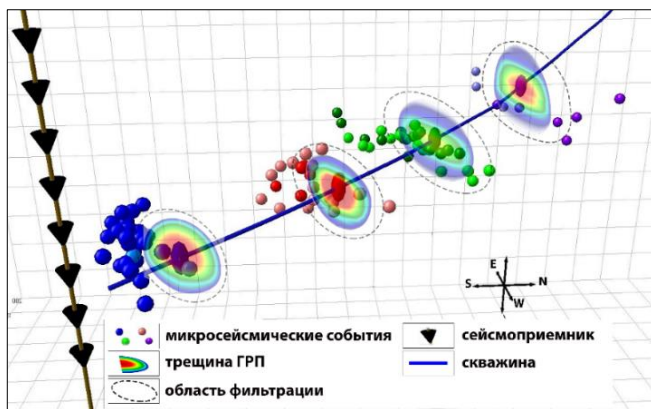


Рисунок 4 – Скважинный микросейсмический мониторинг и модели трещин МГРП

Обработка многозонной горизонтальной скважины тюменской свиты проведена по модели, спроектированной с применением усовершенствованной методики моделирования и разработанной методике оптимизации МГРП. Первые две зоны обрабатывались по первоначальной программе с созданием заданной геометрии трещины. После технического осложнения и невозможности обработки третьей зоны модели оставшихся трещин были оперативно пересчитаны с использованием автоматизированной методики оптимизации, и оставшиеся зоны обрабатывались с созданием более длинных трещин для увеличения зоны дренирования и компенсации потери добычи из-за пропущенной зоны. На данной скважине тюменской свиты не проводились микросейсмические измерения, и параметры трещин определены методом сопоставления модельных и фактических данных обработки. Кроме того, оценка трещин МГРП проведена путем импорта их параметров в гидродинамическую модель и моделированием работы каждой зоны скважины с адаптацией общей истории работы скважины. Нужно отметить, что первоначальная модельная оценка дебита, выполненная до проведения обработки, хорошо совпадает с фактическими данными и с проведёнными трассерными исследованиями, показавшими, что уровень добычи с каждого интервала хорошо коррелируется с параметрами гидродинамического моделирования (Рисунок 5). Такая сходимость результатов разных экспериментов подтверждает корректный выбор параметров модели МГРП и правильную оценку параметров созданных трещин.

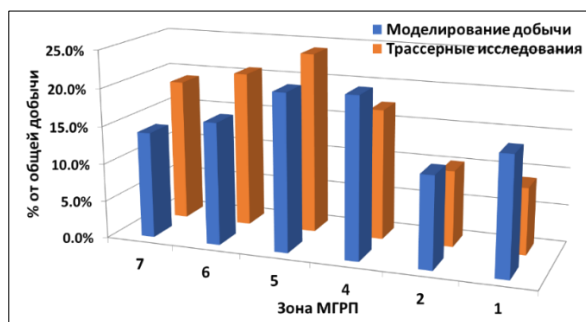


Рисунок 5 – Доля добычи каждой зоны МГРП в общем дебите скважины по данным гидродинамического моделирования и трассерных исследований

Еще одним вариантом проверки интегрированного подхода к проектированию МГРП стала высокоскоростная многозонная обработка [10, 11]. Используя данные и модели, полученные при проведении МГРП тюменской свиты, спроектирован и проведен первый в России

высокоскоростной МГРП. Учитывая полноту данных моделирования и сходимость моделей, полученных в предыдущих обработках, при проведении высокоскоростного МГРП на горизонтальной скважине тюменской свиты не проводилось дополнительных исследований для определения геометрии и ФЕС созданных трещин. Параметры трещин МГРП определены путем сопоставления модельных и фактических данных обработки. Параметры высокоскоростной многозонной обработки, рассчитанные из требования минимизации рисков и при отсутствии опыта подобных работ, не являются оптимальными с точки зрения продуктивности скважины, а были направлены на проверку технологических возможностей метода.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Данная работа направлена на исследование процессов получения информации, моделирования и оптимизации многозонного гидроразрыва низкопроницаемых пластов для повышения его эффективности.

Разработан и обоснован с помощью моделирования, подтвержден натурными экспериментами интегрированный подход к проектированию многозонного гидроразрыва низкопроницаемых пластов, включающий усовершенствованную методику моделирования и разработанную методику оптимизации МГРП.

Усовершенствована методика моделирования МГРП на основе интеграции 1D петрофизической, литолого-геохимической и 3D/4D геологической, геомеханической и гидродинамической моделей.

Разработана методика автоматизированной оптимизации модели МГРП на основе интеграции моделей трещин ГРП и гидродинамической модели пласта.

На этапе подготовки и проектирования МГРП проведена оценка основных геологических, геофизических, геомеханических свойств целевых интервалов и барьеров, а также обоснована необходимость проведения дополнительных исследований для построения оптимальной модели многозонного гидроразрыва низкопроницаемых пластов. Отсутствие некоторых исследований, обусловленных технической возможностью или финансовой ограниченностью проектов, не позволило точно определить некоторые параметры моделей, что привело к недостижению запланированных параметров трещин одной из многозонных обработок и, как следует, к неоптимальной работе скважины. Для корректного моделирования МГРП в низкопроницаемых коллекторах рекомендуется проводить полный комплекс исследований скважин, кернового материала и жидкостей ГРП, особенно для новых месторождений, где параметры пластов не исследованы и для

месторождений на поздней стадии разработки, где параметры пластов, изменившиеся в процессе эксплуатации, требуют уточнения. Также рекомендуется проведение исследований скважин для получения данных о геометрии трещин ГРП и азимуте их распространения. Гидродинамические и трассерные исследования скважин необходимы для калибровки моделей ГРП и гидродинамических моделей пластов.

Экспериментальная проверка интегрированного подхода к проектированию МГРП проведена на двух месторождениях: одно месторождение газовое, низкотемпературное с аномально высоким пластовым давлением и неглубоким залеганием продуктивных пластов, а второе – высокотемпературное, нефтяное с глубоким залеганием продуктивных интервалов. Опробование моделей МГРП на пилотных скважинах показало хорошую сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных. Сопоставление модельных и фактических данных на каждой стадии МГРП показало отличие параметров трещин в пределах 5%, что соответствует точности измерений. Азимуты и геометрия трещин подтверждены результатами скважинного микросейсмического мониторинга и коррелируются с методом сопоставления давлений. Результаты гидродинамического моделирования работы многозонной скважины и трассерных исследований имеют хорошую сходимость и подтверждают корректность проектирования МГРП. Как показал опыт применения автоматизированной оптимизации МГРП, можно значительно сократить затраты на проведение многозонного гидроразрыва при выборе оптимального дизайна. При сокращении использования пропанта и химреагентов на 10%, экономия средств для российской нефтегазовой индустрии составит 2,4 млрд. рублей при 3000 операций МГРП в год.

Дальнейшее развитие предложенного подхода может быть связано с разработкой других типов трудноизвлекаемых запасов: нефтяных оторочек, маломощных коллекторов, залежей высоковязкой нефти и карбонатных коллекторов. Проектирование гидроразрыва сланцевых залежей уже частично использует методики, приведенные в работе, и может быть значительно усовершенствовано с доработкой представленного подхода к условиям нетрадиционных залежей углеводородов.

Еще одним перспективным направлением представляется полная автоматизация процесса проектирования МГРП и создание программного обеспечения, интегрированного с геологическими, гидродинамическими и геомеханическими симуляторами, позволяющего минимизировать использование вычислительных и трудовых ресурсов.

С исследовательской точки зрения представляет интерес развитие

экспериментальной базы для интеграции геохимических и гидродинамических моделей, более точно отражающих влияние гидроразрыва на изменение ФЕС пласта и прогноз добычи после проведения МГРП.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК** (в т.ч., статьи, опубликованные в международных рецензируемых изданиях, входящих в базы данных научного цитирования SCOPUS и РИНЦ)

1. **Астафьев, В.Н.** Интегрированное моделирование многозонного гидроразрыва низкопроницаемых коллекторов. / В.Н. Астафьев, Г.М. Митрофанов // Георесурсы. – 2024. – № 26(3). – С. 116–125. – URL: <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.13>.

2. **Астафьев, В.Н.** Развитие технологий гидроразрыва пласта в современных условиях / В.Н. Астафьев, Ю.Н. Мажирин, Р. Ф. Абдуллин [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2024. – № 2. – С. 100-109.

3. **Астафьев, В.Н.** Комплексирование геофизических, петрофизических и геомеханических методов для построения модели гидравлического разрыва низкопроницаемых коллекторов на примере туронских и юрских отложений Западной Сибири / В.Н. Астафьев, В.В. Воробьев, М.И. Самойлов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2023. № 1–2. С. 40-48.

4. **Астафьев, В.Н.** Роль геофизических исследований в скважинах в эволюции парадигмы гидравлического разрыва пласта / В.Н. Астафьев, И. Н. Ельцов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Вып. 6 (140). – С. 9-37.

5. Samoilov, M. I. Multistage Hydraulic Fracturing of the Tyumen Suite Reservoirs of Em-Yogovskoye Field: Frac-Design, Practice, Results / M. I. Samoilov, **V. N. Astafyev**, E. F. Musin // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, October 2021 // – URL: <https://doi.org/10.2118/206651-MS>.

6. A Decade of Multi-Zone Fracturing Treatments in Russia / **V. Astafyev**, M. Samoilov, I. Fayzullin [et al.] // SPE Symposium: Hydraulic Fracturing in Russia. Experience and Prospects, 22-24 September, Virtual. - 2020. – URL: <https://doi.org/10.2118/203883-MS>.

7. Andreev, A. Integrated Approach to Multistage Fracturing Design / A. Andreev, **V. Astafyev**, M. Samoilov // SPE Symposium: Hydraulic Fracturing in Russia. Experience and Prospects, 22-24 September, Virtual. – 2020. – URL: <https://doi.org/10.2118/203896-MS>.

8. Multistage Hydrocarbon-Based Fracturing in Tight Gas Formation / **V. Astafyev**, M. Lushev, A. Mitin [et al.] // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual. – 2020. – URL: <https://doi.org/10.2118/202050-MS>.

9. 3D Fracture Modeling and Fracture-Height Mapping Using Different Logging Methods in the Vertical Well / A. Chernyshev, M. Podberезhny, **V. Astafyev** [et al.] // SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition – 2016. – URL: <https://doi.org/10.2118/182117-MS>.

#### **Другие значимые публикации**

10. First High-Rate Hybrid Fracture in Em-Yoga Field, West Siberia, Russia / Z. Kaluder, M. Nikolaev,..., **V. Astafyev** [et al.] // Offshore Technology Conference-Asia (25-28 March, Kuala Lumpur, Malaysia) – 2014. – URL: <https://doi.org/10.4043/24712-MS>.

11. **Астафьев, В.** Разработка трудноизвлекаемых запасов углеводородов: высокоскоростной МГРП тюменской свиты Ем-Ёговского месторождения / В. Астафьев, М. Самойлов // Инженерная практика – 2015. – №05. – С.46-54.

12. **Астафьев, В.** 3D моделирование трещины ГРП: Сравнительный анализ результатов картирования высоты трещины различными геофизическими методами / В. Астафьев, А. Чернышев, М. Подберезный // Oil & Gas Journal Russia. – 2017. – №12 (122). – С. 58–63.

Подписано в печать 22.01.2025 г. Печать офсетная.  
Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16. Усл. печ. 1,2 л.

Тираж 100 экз. Заказ № 951

Отпечатано в типографии «АЛЕКСПРЕСС»

ИП Малыгин Алексей Михайлович

630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф.104

Тел. (383) 217-43-46