

УТВЕРЖДАЮ

И.о. руководителя Федерального
государственного бюджетного научного
учреждения Уфимского федерального
исследовательского центра Российской
академии наук (УФИЦ РАН)

доктор биологических наук

Мартыненко Василий Борисович



« 11 » мая 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения
Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук

Диссертация «Фильтрация в трещине гидроразрыва пласта при различных режимах работы скважины» выполнена в лаборатории «Механика многофазных систем» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

В период подготовки диссертации и по настоящее время соискатель Фокеева Нина Олеговна обучается в аспирантуре по очной форме обучения в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении Уфимском федеральном исследовательском центре Российской академии наук по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика, работает в ООО «РН-БашНИПНефть» в должности старшего специалиста отдела сопровождения проекта ТиТ (ТиТ – месторождения им. Р. Требса и А. Титова).

В 2019 году окончила с отличием магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего

образования «Башкирский государственный университет» по направлению подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика.

Справка о сданных кандидатских экзаменах по истории и философии науки, иностранному языку (английскому) выдана в 2023 году Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы».

Справка о периоде обучения со сведениями о сданном кандидатском экзамене по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы выдана в 2023 году Федеральным государственным бюджетным научным учреждением Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук.

Научный руководитель – Башмаков Рустэм Абдрауфович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического анализа факультета математики и информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность исследования. Гидроразрыв пласта (ГРП) – один из важнейших методов интенсификации добычи углеводородов за счёт образования высокопроводящих трещин в пласте. Этот метод воздействия на пласт, способствующий повышению продуктивности скважин, позволяет резко и существенно увеличить как дебит добывающих, так и приёмистость нагнетательных скважин.

В настоящее время в связи с вовлечением в разработку трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) метод гидравлического разрыва пласта не теряет своей актуальности и активно применяется по всему миру. Количество проведённых операций гидроразрыва в год исчисляется тысячами. В России происходит импортозамещение технологий и сервиса в нефтегазовой отрасли, за три года ожидается создание полностью отечественного флота ГРП, что ещё раз подтверждает востребованность данной технологии.

Множество работ посвящено теме гидравлического разрыва пласта, накопленный опыт его реализации позволяет совершенствовать технологию. Развиваются теоретические представления о гидроразрыве, многие задачи решаются с привлечением математических методов. На практике важной задачей является моделирование нестационарного процесса фильтрации жидкости в системе «трещина-пласт», в частности, моделирование динамики дебита, а также давления как в трещине ГРП, так и в самой скважине при переменном режиме её работы.

Одна из проблем состоит в том, что геометрические и фильтрационные параметры трещины, образующейся при ГРП, сложно спрогнозировать, а это ключевые факторы для правильной оценки эффективности и экономической целесообразности данной процедуры. Поэтому важен вопрос исследования параметров трещины ГРП как отклика пласта на проведённый гидроразрыв.

Целью диссертационной работы является установление закономерностей и получение аналитических выражений, описывающих процесс нестационарной фильтрации в трещине ГРП при переменных режимах работы скважины с учётом перетока жидкости между трещиной и пластом на основе теоретической модели, и решение обратной задачи по определению проводимости трещины ГРП.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- определены аналитические решения интегро-дифференциального уравнения, описывающего распределение давления в вертикальной трещине ГРП при ступенчатом и непрерывном изменении забойного давления скважины;
- построены аналитические решения интегро-дифференциального уравнения, описывающего динамику давления в вертикальной трещине ГРП при ступенчатом и непрерывном изменении расхода жидкости скважины;
- получены формулы, позволяющие определять давление на забое при заданном переменном расходе жидкости скважины, а также вычислять расход скважины по заданному закону изменения забойного давления;

- решена обратная задача по определению проводимости трещины ГРП при известном расходе жидкости и динамике забойного давления;
- сопоставлены полученные результаты с промысловыми данными реальных скважин.

Научная новизна работы. Результаты диссертационной работы являются новыми. На основе теоретической модели выведены аналитические решения, описывающие фильтрацию флюида в трещине ГРП при различных режимах работы скважины. Выявлена закономерность между динамикой расхода жидкости и изменением давления на забое скважины и в трещине ГРП, которая позволяет более точно оценивать продуктивность скважины после ГРП и делать выводы об эффективности проведённой операции. Проведена верификация решений посредством сопоставления с промысловыми данными. Представлена формула для определения проводимости трещины ГРП на основе данных эксплуатации скважины после проведения гидроразрыва и геолого-физических характеристик (ГФХ) продуктивных пластов.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты проведённого исследования позволяют уточнить и расширить теоретические представления о фильтрации флюида в трещине ГРП. Получены аналитические решения, которые устанавливают взаимосвязь между изменяющимся расходом жидкости, а также давлением в скважине и трещине ГРП с учётом утечки жидкости в продуктивный пласт. С практической точки зрения особую ценность имеет возможность определения проводимости трещины ГРП на основе полученных решений. Результаты могут быть использованы для уточнения интерпретации гидродинамических исследований скважин (ГДИС) и при построении дизайна гидроразрыва пласта.

Методы исследования. Для установления научных результатов в диссертационной работе применены методы, используемые при решении задач механики сплошных сред. Вывод аналитических решений осуществлялся на основе уравнений математической физики. Расчёты реализованы с помощью специального программного пакета, а также посредством математического

моделирования в среде Microsoft Visual Studio. Для проверки построенной модели применялся сравнительный анализ результатов моделирования с реальными промысловыми данными.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Аналитические решения интегро-дифференциального уравнения, описывающего динамику давления в трещине ГРП при изменяющемся забойном давлении скважины.
- Аналитические решения, отражающие реакцию давления в скважине и трещине ГРП при изменении дебита скважины, а также позволяющие определять расход жидкости по динамике забойного давления. Результаты получены как для дискретно, так и для непрерывно изменяющегося расхода.
- Решение обратной задачи по определению параметров трещины гидроразрыва на основе показателей эксплуатации скважины, таких как давление и дебит при различных режимах её работы, и получение явной формулы для расчёта проводимости трещины ГРП.

Обоснованность и достоверность результатов работы основана на корректной физической и математической постановке задач; применении при их решении фундаментальных законов и постулатов механики сплошных сред и теории фильтрации; обусловлена достаточно хорошим согласованием с фактическими промысловыми данными и результатами других исследователей в данной области.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на посвящённых данной тематике семинарах в Институте механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН. Кроме того, основные положения и результаты исследования были представлены на следующих конференциях:

- Международная конференция «Комплексный анализ, математическая физика и нелинейные уравнения», Южный Урал, Якты-Куль, 13-17 марта 2023 г.;

- полуфинал Всероссийского инженерного конкурса 2022/23 (ВИК), *лауреат полуфинала*;
- Ежегодная межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е.В. Арменского, г. Москва, 27 февраля-7 марта 2023 г.;
- VIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы физико-математических наук» (СПФМН-2022), г. Орёл, 25-26 ноября 2022 г.;
- Международная научно-практическая конференция имени Д.И. Менделеева, г. Тюмень, 24-26 ноября 2022 г., *диплом 3 степени*;
- XVI Всероссийская молодежная научная конференция Мавлютовские чтения, г. Уфа, 25-27 октября 2022 г., *диплом 2 степени*;
- XXIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (УМ-2022), г. Новосибирск, 24-28 октября 2022 г., *диплом победителя*;
- Российский нефтегазовый технический конгресс (РНТК), г. Москва, 11-13 октября 2022 г.;
- Международная конференция «Марчуковские научные чтения 2022» (МНЧ-2022), г. Новосибирск, 3-7 октября 2022 г.;
- Всероссийская научно-практическая конференция, посвящённая памяти профессора Усманова Салавата Мударисовича «Обратные задачи и математические модели», г. Бирск, 16 сентября 2022 г.;
- Всероссийская конференция молодых учёных-механиков (YSM-2022), г. Сочи, 4-14 сентября 2022 г.;
- Конкурс научных докладов молодых учёных ИМех УФИЦ РАН, г. Уфа, 25 апреля 2022 г., *диплом 1 степени*;
- XXII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (УМ-2021), г. Новосибирск, 25-29 октября 2021 г.;

- Международная научная конференция «Уфимская осенняя математическая школа», г. Уфа, 6-9 октября 2021 г.;
- V Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе», г. Стерлитамак, 16-18 сентября 2021 г.;
- IX Международная научная конференция «Современные проблемы математики и физики», посвящённая 70-летию чл.-корр. АН РБ К.Б. Сабитова, г. Стерлитамак, 12-15 сентября 2021 г.;
- 23-конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2021», г. Геленджик, 6-10 сентября 2021 г., *доклад отмечен как лучший в секции*;
- Конкурс научных докладов молодых учёных ИМех УФИЦ РАН, г. Уфа, 17 июня 2021 г., *диплом 3 степени*;
- VII Российская конференция с международным участием «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения», посвящённая 80-летию академика РАН Р.И. Нигматулина, г. Уфа, 5-10 октября 2020 г.;
- IX Международная молодёжная научно-практическая конференция «Математическое моделирование процессов и систем», г. Стерлитамак, 30 октября-1 ноября 2019 г.

Представленные в диссертации исследования выполнялись при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 21-11-00207, <https://rscf.ru/project/21-11-00207/>.

В диссертационной работе представлены результаты исследований, выполненных в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в сфере научной деятельности номер 0246-2019-0052 "Численные, аналитические и экспериментальные методы в многофазных, термовязких и микродисперсных системах газогидродинамики".

Личный вклад автора. Шагаповым Владиславом Шайхулагзамовичем была дана постановка задачи и предложены методы её решения. Вывод аналитического решения, реализация в специальных пакетах, анализ полученных результатов осуществлены совместно с научным руководителем. Сопоставление решений с

промысловыми данными, программирование на языке C++, доклады на конференциях, презентации работы на конкурсах, оформление и подготовка части публикаций выполнены автором самостоятельно. Результаты совместных работ представлены с согласия всех авторов.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 публикациях. В перечень научных изданий, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, вошла 1 статья (квартиль Q1). В научных журналах перечня RSCI опубликовано 2 статьи. В РИНЦ входят 12 работ в сборниках трудов Международных и Всероссийских конференций, а также 2 статьи в научных журналах. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основное содержание работы полностью раскрывается в следующих публикациях. В изданиях, включенных в перечень RSCI:

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
1	Давление и дебит при переходных режимах работы скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва	Прикладная математика и механика. – 2022. – Т. 86, Вып. 6. – С. 998–1012.	Р.А. Башмаков, Н.О. Фокеева, В.Ш. Шагапов	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.
2	Особенности фильтрации флюидов в коллекторах, подверженных гидроразрыву пласта, при переходных режимах работы скважины	Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63, №3. – С. 117–127.	Р.А. Башмаков, Н.О. Фокеева, В.Ш. Шагапов	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.

В научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
3	Evolution of Filtration Pressure Waves in a Hydraulic Fracture during Transient-Well-Operation Modes	Mathematics 2023, 11, 98	V.S. Shagapov, R.A. Bashmakov, N.O. Fokeeva, A.A.Shammato va	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
4	Динамика давления на скважине с трещиной ГРП по заданному дебиту	Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023617532. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.04.2023	Е.А. Александрова, Р.А. Башмаков, А.А. Махота, Н.О. Фокеева, К.Р. Яхина	Участие в реализации модели.

В других изданиях:

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
5	Зависимость между давлением и расходом при переходных режимах работы скважины с ГРП	Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе: Сборник трудов V Международной научно-практической конференции РБ. – Стерлитамак. – 2021. – С. 316–320.	Р.А. Башмаков, В.Ш. Шагапов, Н.О. Фокеева	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.

6	К моделированию работы скважины с трещиной ГРП	Вестник Башкирского университета – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 10–14.	Н.О. Фокеева, А.А. Шамматова	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.
7	Об определении параметров трещины ГРП	Материалы IX Международной молодежной научно-практической конференции. – Стерлитамак. – 2019. – С. 251–253.	З.Н. Мигранова, Р.А. Башмаков, Н.О. Фокеева	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.
8	Задача о фильтрации флюида при переходных режимах работы скважина с ГРП	Материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения». – Уфа. – 2022. – Т. 5. – С. 1262–1265.	Н.О. Фокеева, Р.А. Башмаков	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.

9	Моделирование работы вертикальной скважины с ГРП при переходном режиме	Материалы международной научно-практической конференции им. Д.И. Менделеева: сборник статей. Т. 3. – Тюмень. – 2023. – С. 225–226.	Н.О. Фокеева, Р.А. Башмаков	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.
10	О динамике давления в трещине ГРП при переходных режимах работы скважины	Уфимская осенняя математическая школа: Материалы международной конференции. – Уфа. – 2022. – С. 457–459.	Н.О. Фокеева, Р.А. Башмаков	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных. Проведение расчетов, реализация модели.
11	Особенности фильтрации при переходных режимах работы скважины с трещиной ГРП	XXII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям: тезисы докладов. – Новосибирск. – 2021. – С. 35–36.	Н.О. Фокеева, Р.А. Башмаков	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.
12	Распределения давления в трещине ГРП при переходных режимах работы скважины	Уфимская осенняя математическая школа: Материалы международной конференции. – Уфа. – 2021. – С. 242–244.	Н.О. Фокеева, Р.А. Башмаков	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.

13	Распределение дебита и давления в скважине с ГРП при переходных режимах работы	XXIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям: тезисы докладов. – Новосибирск. – 2022. – С. 39–40.	Н.О. Фокеева, Р.А. Башмаков	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.
14	Распределение дебита и давления в скважине с ГРП при переходных режимах работы	Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли. – Москва. – 2022. – С. 103–105.	Н.О. Фокеева, Р.А. Башмаков	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных. Проведение расчетов, реализация модели.
15	Динамика давления в трещине гидроразрыва при переходных режимах работы скважины	Многофазные системы. 2022. Т. 17, № 3–4. С. 195.	Н.О. Фокеева	Участие в подготовке работы, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.
16	Динамика давления жидкости в трещине гидроразрыва при изменяющихся режимах работы скважины	Многофазные системы. – 2022. – Т. 17, № 1–2. – С. 113–121.	В.Ш. Шагапов, Р.А. Башмаков, Н.О. Фокеева, А.А. Шамматова	Участие в подготовке работы, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.

17	О фильтрации жидкости в трещине ГРП при переменных режимах работы скважины	Многофазные системы. – 2020. – Т. 15, № 1–2. – С. 121.	В.Ш. Шагапов, Н.О. Фокеева, З.Н. Мигранова	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Оформление результатов.
18	Построение модели вторичной пустотности карбонатного коллектора на примере одного из месторождений Тимано-Печорской провинции	Материалы 23-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (Геомодель 2021). Геленджик. 2021. С. 115.	Д.Р. Ардисламова, В.А. Колесов, Н.О. Фокеева, А.Г. Малов, С.А. Рабцевич, М.Н. Харисов	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.

Обоснование выбранной специальности и отрасли науки диссертации.

Специальность 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, поскольку результаты включают в себя исследования на основе механики сплошной среды пространственных нестационарных процессов и явлений, сопровождающих течения однородных и многофазных сред при механических воздействиях. Задачей механики жидкости, газа и плазмы является построение и исследование математических моделей для описания параметров потоков движущихся сред в широком диапазоне условий, интерпретация экспериментальных данных с целью прогнозирования и контроля природных явлений и технологических процессов, включающих движения текучих сред.

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам раздела «Области исследований» паспорта данной специальности:

п. 2. «Реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях», поскольку в работе рассматриваются жидкости, характеризующиеся определенными свойствами.

п. 5. «Течения сжимаемых сред и ударные волны», поскольку рассматриваются волны давления, распространяющиеся от скважины по трещине и далее в окружающий трещину пласт.

п. 8. «Течение жидкостей и газов в пористых средах», поскольку в работе изучается фильтрация жидкости в трещине ГРП и окружающей пористой среде.

п. 16. «Тепломассоперенос в газах и жидкостях», поскольку описывается течение жидкости от скважины в гидроразрывную трещину и окружающую трещину пористую среду.

п. 19. «Точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред», поскольку в диссертационной работе найдены аналитические решения и выполнена численная реализация поставленной задачи.

п. 20. «Разработка математических методов и моделей гидромеханики», так как разрабатываются математические методы, описывающие связь между расходом жидкости и давлением в трещине ГРП.

Отрасль науки – физико-математическая, поскольку приведены результаты исследований, соответствующие перечисленным областям научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы; в качестве аппарата исследований преобладают математические методы, получены результаты в виде аналитических решений.

Диссертация «Фильтрация в трещине гидроразрыва пласта при различных режимах работы скважины» Фокеевой Нины Олеговны соответствует пп. 9-11, 13, 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании Ученого совета ИМех УФИЦ РАН. Присутствовали на заседании 9 человек. Результаты голосования: «за» – 9, «против» – 0, «воздержались» – 0. Протокол № 2 от «11» мая 2023 г.

И.о. директора ИМех УФИЦ РАН

кандидат физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), доцент



Галимзянов Марат Назипович

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Уфимский федеральный исследовательский центр
Российской академии наук (УФИЦ РАН),
Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное
подразделение УФИЦ РАН (ИМех УФИЦ РАН)
Россия, 450054, Республика Башкортостан
г. Уфа, пр. Октября, 71.
Телефон: 8(347)235-52-55.
E-mail: imran@anrb.ru

Подпись Галимзянова М.Н. заверяю:

Ученый секретарь ИМех УФИЦ РАН



Э.Ф. Гайнуллина

« 11 » мая 2023 г.