

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и
инновационной работе
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Уфимский государственный
нефтяной технический университет»
доктор технических наук, профессор
Ибрагимов Ильдус Гамирович



2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Диссертация «Фильтрация флюида в трещине ГРП, перпендикулярной к горизонтальной скважине» выполнена на кафедре «Информационные технологии и прикладная математика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

В период подготовки диссертации и по настоящее время соискатель Аносова Елизавета Петровна работает на кафедре «Информационные технологии и прикладная математика» (до 2020 года наименование кафедры – «Математика») Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в должности старшего преподавателя.

В 2003 году окончила с отличием Башкирский государственный университет по специальности прикладная математика.

Справка о сданных кандидатских экзаменах выдана в 2024 году Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Научный руководитель – Нагаева Зиля Мунировна, кандидат физико-математических наук по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, доцент кафедры «Информационные технологии и прикладная математика (ИТМ)» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Уфимского государственного нефтяного технического университета.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы.

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) в горизонтальных скважинах позволяет увеличить площадь дренирования и тем самым увеличить производительность скважины. Использование горизонтальных скважин позволяет ограничить поступление нежелательных флюидов при разработке залежей с активной подошвенной водой и газовой шапкой.

Большое количество работ посвящено теме исследования ГРП, описанию процесса фильтрации флюида в трещине ГРП и окружающей ее пористой и проницаемой среде. Данная тема достаточно полно исследована для стационарной фильтрации. Для нестационарной же фильтрации большая часть исследований проводится с помощью гидродинамических методов исследования коллекторов, где процессы фильтрации рассматриваются для асимптотически ограниченных интервалов времени. Данные методы исследования основываются на изучении параметров притока флюида к скважине при установившихся или неустойчивых режимах ее работы.

В настоящее время остаётся актуальной проблема адекватного описания процесса фильтрации вблизи горизонтальной скважины. Для этого в основном активно используются численные методы. Аналитических моделей, доведённых до готовых точных формул, описывающих процесс распространения возмущения давления как в трещине ГРП, так и в

окружающей трещину пористой и проницаемой среде, недостаточно. Наличие точных аналитических решений позволит получать более детальную информацию о давлении вблизи скважины и на её забое, анализировать продуктивность выработки пластов и определять их коллекторские свойства. Кроме того, точные аналитические решения позволяют тестировать сложные решения, найденные численными методами по другим моделям.

Цель диссертационной работы заключается в построении математической модели, описывающей нестационарную фильтрацию флюида в системе «пласт – трещина ГРП – скважина», получение по этой модели аналитических решений задачи о распределении давления в трещине ГРП, которая расположена перпендикулярно к горизонтальной цилиндрической скважине, с учетом фильтрационных потоков между трещиной и пористым пластом.

Для достижения цели определены и решены следующие задачи:

– предложена аналитическая модель, представляющая собой интегро-дифференциальное уравнение, для описания эволюции давления в трещине ГРП, расположенной перпендикулярно к горизонтальной скважине, с учетом фильтрационного потока флюида через стенки трещины в окружающую породу;

– изучена динамика гармонических фильтрационных волн давления в трещине ГРП, расположенной перпендикулярно к горизонтальной скважине; проведен сравнительный анализ результатов решения задачи распространения гармонических волн давления при наличии трещины ГРП и при её отсутствии;

– получены точные аналитические решения, описывающие эволюцию полей давления жидкости в трещине ГРП, перпендикулярной по отношению к горизонтальной скважине, учитывающие фильтрационное течение через стенки трещины в пористую среду, при повышении давления на скважине на фиксированную величину с дальнейшим удержанием данного значения;

– для проведения анализа эффективности применения технологии ГРП рассмотрена задача о распределении давления на забое скважины при отсутствии трещины ГРП;

– получены точные аналитические решения, описывающие эволюцию полей давления жидкости в трещине ГРП, перпендикулярной стволу горизонтальной скважины, учитывающие фильтрационные потоки сквозь поверхность трещины (в окружающую пористую среду или из пласта) при работе скважины в режиме постоянного расхода;

– получены приближенные решения методом последовательной смены стационарных состояний (ПССС), описывающие эволюцию полей давления жидкости в трещине ГРП, перпендикулярной горизонтальной скважине при повышении давления на скважине на фиксированную величину с дальнейшим удержанием данного значения, а также при работе скважины в режиме постоянного расхода; проведен сравнительный анализ полученных точных и приближенных решений;

– изучено влияние фильтрационно-ёмкостных характеристик пласта и трещины ГРП на динамику распределения давления в трещине и на забое скважины.

Научная новизна работы.

В ходе проведенных исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

– в радиальной постановке построена математическая модель в виде интегро-дифференциального уравнения для описания распределения давления в трещине ГРП, перпендикулярной стволу горизонтальной скважины, с учетом фильтрации жидкости через стенки трещины в окружающую трещину пористую и проницаемую среду; разработанная модель позволяет определять приток флюида к горизонтальной скважине;

– получены точные аналитические решения для распределения давления жидкости в трещине ГРП, с учетом фильтрации флюида через стенки трещины в окружающую трещину пористую среду при различных режимах работы

скважины (при повышении давления на скважине с дальнейшим удержанием этого значения и постоянного расхода), получены формулы для определения забойного давления и дебита скважины;

– получены приближенные решения методом ПССС для распределения давления жидкости в трещине ГРП при повышении давления на скважине с дальнейшим удержанием постоянного значения и при задании постоянного расхода на скважине.

Теоретическая и практическая значимость.

1) Результаты работы позволяют расширить теоретические основы описания нестационарной фильтрации для горизонтальных скважин, пересеченных перпендикулярными трещинами.

2) Позволяют установить качественные и количественные закономерности формирования полей давления в системе «скважина – трещина ГРП – пласт» при различных режимах работы скважины, а именно при повышении давления на забое скважины с дальнейшим удержанием данного значения и при работе скважины в режиме постоянного расхода.

3) Показано, что трещина ГРП в пористой и проницаемой среде является волновым каналом для низкочастотных колебаний давления в призабойной зоне скважины. Характерное расстояние затухания волн в трещинах, и в пласте вблизи нее может быть значительно выше, чем в однородной пористой среде при отсутствии трещины.

4) На основе полученных аналитических решений, соответствующих заданию на забое скважины постоянной депрессии и/или расхода, представляется возможным провести анализ изменения фильтрационно-ёмкостных характеристик призабойных зон скважин, их продуктивности при гидроразрыве пластов и закономерности распространения давления в трещинах.

5) Полученные решения могут служить основой для тестирования алгоритмов расчетов при теоретическом описании процессов фильтрации в пластах с трещинами ГРП по более сложным математическим моделям.

Методы исследования.

В диссертационной работе для постановки и решения задач были использованы уравнения математической физики, методы теории обыкновенных дифференциальных уравнений, методы решений уравнений в частных производных. Для нахождения точных решений использовались методы интегральных преобразований Лапласа и Меллина, методы теории функций комплексного переменного. Для визуализации численных решений через графическое представление использовались пакеты прикладных программ GNU Octave и Maple.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель нестационарной фильтрации, в виде интегро-дифференциального уравнения для описания фильтрации жидкости в трещине ГРП, расположенной перпендикулярно стволу горизонтальной скважины, с учетом фильтрации флюида в пласт (или из пласта в трещину и скважину).
2. Решения, описывающие распределение давления в гидроразрывной трещине, расположенной перпендикулярно стволу горизонтальной скважины при гармоническом законе изменения давления в скважине.
3. Точные аналитические решения, описывающие эволюцию давления в трещине ГРП, расположенной перпендикулярно стволу горизонтальной скважины, с учетом фильтрационных потоков между пористым пластом и гидроразрывной трещиной, при повышении давления на скважине на фиксированную величину с дальнейшим удержанием данного значения.
4. Точные аналитические решения, описывающие эволюцию давления в трещине ГРП, расположенной перпендикулярно стволу горизонтальной скважины, а также закон изменения давления на забое скважины, при работе скважины в режиме постоянного расхода.

5. Приближенные решения, полученные методом ПССС, описывающие эволюцию давления в трещине ГРП при повышении давления на скважине на фиксированную величину с дальнейшим удержанием этого значения и при работе скважины в режиме постоянного расхода.

Степень достоверности и апробация результатов обусловливается корректностью физической и математической постановки задачи, применением при разработке математических моделей фундаментальных законов механики многофазных сред и теории фильтрации; получением точных и приближенных решений, непротиворечащих общим гидродинамическим представлениям и находящимся в соответствии с результатами, которые были получены другими исследователями в рассматриваемой области.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

- XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Уфа, август 2019 г.);
- Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды – 2020» (28 сентября – 2 октября 2020 г. Казань);
- семинары лаборатории механики многофазных систем Института механики им. Р. Р. Мавлютова под руководством доктора физико-математических наук, профессора В.Ш. Шагапова, (г. Уфа, 2019 – 2022 гг.);
- IV Международная научно – практическая конференция «Физика конденсированного состояния и ее приложения (Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, сентябрь 2022 г.);
- Международная научная конференция «Уфимская осенняя математическая школа» (г. Уфа, сентябрь 2022 г.); XX Всероссийская конференция молодых ученых по

математическому моделированию и информационным технологиям (г. Новосибирск, октябрь 2022 г.);

- Международная научная конференция «Комплексный анализ, математическая физика и нелинейные уравнения» (Республика Башкортостан, оз. Банное, 13-17 марта 2023 г.);
- Третья международная летняя конференция «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения» (25-30 июня, г. Уфа);
- XXIV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Красноярск, октябрь 2023 г., **диплом победителя**);
- Международная научно-практическая конференция имени Д.И. Менделеева, посвященная 15 – летию Института промышленных технологий и инжиниринга, (г. Тюмень, 16-18 ноября 2023 г., **диплом III степени**).

Личный вклад.

Автором совместно с научным руководителем проведена разработка алгоритма решения задачи, постановка которой была предложена доктором физико-математических наук по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, профессором, академиком АН РБ Шагаповым Владиславом Шайхулагзамовичем. Получение точных и приближенных решений, программирование и численная реализация задачи, анализ полученных результатов, оформление полученных результатов, подготовка публикаций выполнены автором самостоятельно.

Основные результаты диссертационной работы представлены в 13 работах, опубликованных в журналах и научных сборниках, в том числе 4 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих одновременно в наукометрические базы Scopus, Web of Science, и RSCI.

Основное содержание работы полностью раскрывается в следующих публикациях:

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

№ п/п	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
1	О динамике гармонических фильтрационных волн в гидроразрывной трещине, расположенной перпендикулярно к скважине	РАН. Акустический журнал. – 2020. – Т. 66. – № 6. – С. 669 – 674.	В.Ш. Шагапов, Е.П. Аносова, З.М. Нагаева	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.
2	Упругий режим фильтрации жидкости к скважине через перпендикулярную ей трещину, образовавшуюся при гидроразрыве пласта	Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63. – № 4. – С. 105 – 115.	В.Ш. Шагапов, З.М. Нагаева, Е.П. Аносова	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.
3	Фильтрация флюида к скважине через радиальную трещину ГРП при постоянном расходе	Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2023. – № 2. – С. 1 – 12.	Е.П. Аносова, З.М. Нагаева, В.Ш. Шагапов	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели.

				Оформление результатов.
4	Determination of parameters of hydraulic fracture perpendicular to borehole axis	Lobachevskii Journal of Mathematics – 2023. – V.44. – N 5. – p. 1571 – 1578.	R.A. Bashmakov, Z.M. Nagaeva, E.P. Anosova, A.A. Shammatova	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.

В других изданиях:

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
5	Упругий режим фильтрации жидкости к скважине через трещину ГРП	Физика конденсированного состояния и ее приложения. Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак. – 2022. С. 87–90.	В.Ш. Шагапов, Е.П. Аносова, З.М. Нагаева	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.
6	Фильтрация флюида в трещине ГРП, перпендикулярной скважине	Уфимская осенняя математическая школа. Материалы Международной научной конференции. – Уфа. – 2022. С. 294 – 295.	Е.П. Аносова, З.М. Нагаева	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.

7	Фильтрация флюида в трещине ГРП, расположенной перпендикулярно горизонтальной скважине	Комплексный анализ, математическая физика и нелинейные уравнения. Сборник материалов Международной научной конференции. – Уфа. – 2023. С. 81.	З.М. Нагаева, Е.П. Аносова	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.
8	Динамика давления в трещине ГРП, перпендикулярной скважине	Тезисы XXIII Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. Тезисы докладов. – Новосибирск. – 2022. С.7.	Е.П. Аносова, З.М. Нагаева	Участие в подготовке работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.
9	Фильтрационные волны давления в вертикальной трещине ГРП, инициируемые гармоническими колебаниями в горизонтальной скважине	XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов в 4-х томах. – Уфа. – 2019. С. 1159 – 1161.	Е.П. Аносова	Подготовка работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.
10	Волны давления, возникающие	Всероссийская научная конференция	Аносова Е.П.	Подготовка работы, рисунков, анализ полученных данных,

	е при фильтрации флюида в трещине ГРП, расположенной перпендикулярно к скважине	«Актуальные проблемы механики сплошной среды – 2020». Материалы докладов. – Казань. 2020. С. 29 – 32.		итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.
11	Фильтрация флюида к скважине через трещину ГРП при постоянном расходе	Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения. Сборник тезисов. – Уфа. – 2023. С. 12 – 13.	Е.П. Аносова, З.М. Нагаева	Подготовка работы, рисунков, анализ полученных данных, итогов работ. Проведение расчетов, реализация модели. Оформление результатов.

Обоснование выбранной специальности и отрасли науки диссертации.

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

п. 20. «Разработка математических методов и моделей гидромеханики», поскольку в диссертационной работе построена математическая модель, описывающая распределение давления в трещине.

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 флюида в трещине ГРП, перпендикулярной к горизонтальной скважине» Аносовой Елизаветы Петровны 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 кафедры информационных технологий и прикладной математики ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». Присутствовало на заседании 24 человека. Результаты голосования: «за» – 24, «против» – 0, «воздержались» – 0. Протокол № 7 от 22.02.2024 г.

И.о. Заведующего кафедрой информационных технологий и прикладной математики ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кандидат социологических наук, доцент

Биккулов Александр Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». Почтовый адрес организации: Россия, 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, Ул. Космонавтов, д.1, тел.: +7(347) 242-87-15; e-mail: kafedra-matematiki@rambler.ru

Подпись Биккулова А.С. заверяю:
Начальник отдела по работе с персоналом
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»



Ольга Анатольевна Дадаян

01.03.2024