

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

на диссертационную работу ХИСАМОВА АРТУРА АЛЬФИРОВИЧА на тему «**Аналитическое исследование нестационарной фильтрации жидкости в системе пласт-трещина гидроразрыва**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность работы.** На современном этапе развития нефтегазодобычи одним из эффективных, а иногда и единственно возможным способом добычи нефти и газа является гидроразрыв пласта (ГРП). Этот метод заключается в создании в пласте высокопроводящих трещин, через которые осуществляется гидродинамическая связь пласта и скважины. При наличии трещин ГРП существенно изменяется геометрия фильтрационных потоков, поэтому использование классических (плоско-линейных и плоско-радиальных) моделей не представляется возможным. Вследствие этого является актуальным рассмотренное в диссертационной работе моделирование фильтрации в системе пласт-трещина на основе билинейной модели, которая представляет собой совокупность двух взаимосвязанных потоков пласте и трещине. В работе получены аналитические решения задач нестационарной фильтрации в системе пласт-трещина ГРП в рамках моделей трещины неограниченной и ограниченной протяженностей. При этом рассмотрены граничные условия, описывающие различные режимы работы скважины (заданная депрессия, заданный дебит, скин-эффект). Следует отметить, что в работе получены аналитические решения рассматриваемых задач, что является актуальным на современном этапе широкой цифровизации моделей.

### **Научная новизна.**

Наиболее существенный научный интерес представляют следующие результаты диссертационного исследования.

Аналитические решения задач нестационарной фильтрации в системе пласт-трещина гидроразрыва в более общей постановке, а именно с учетом фильтрации в пласте и упругоэластичности трещины. Установлено, что при наличии трещины качественно и количественно изменяются зависимости давления, скорости фильтрации и дебита от фильтрационных характеристик системы пласт-трещина ГРП.

Аналитические решения задач, описывающих нестационарную фильтрацию в системе пласт-трещина ГРП конечной протяженности. На основе анализа этих решений исследовано влияние длины трещины на основные характеристики (распределение давления, скорость фильтрации, дебит скважины и давление на забое скважины) изучаемых процессов.

Модель нестационарной фильтрации в системе пласт-трещина гидроразрыва при наличии скин-зоны в трещине, на основе которой изучено влияние характеристик скин-зоны, трещины и пласта на распределение давления и дебит скважины.

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

Теоретическая значимость диссертационной работы связана, с тем, что в ней получены аналитические решения, позволяющие провести качественный и количественный анализ закономерностей формирования нестационарного поля давления при различных режимах работы скважины. Аналитические решения возможно использовать для верификации и валидации моделей и алгоритмов численных расчетов.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные выражения для давления на забое скважины, можно рассматривать как типовые кривые и использовать при интерпретации данных гидродинамических исследований скважин. Результаты моделирования нестационарной фильтрации при граничном условии третьего рода позволяет оценить влияние характеристик скин-зоны на эксплуатационные характеристики скважины. Аналитические выражения для давления и скорости фильтрации можно использовать при моделировании

фильтрационных процессов, сопровождаемых конвективным переносом субстанции (тепла, трассеров) в задачах термометрии и трассерных исследований.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов** соответствуют общепринятым в рамках специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Достоверность результатов работы обеспечивается корректной постановкой задач с использованием фундаментальных уравнений теории фильтрации. Аналитические решения построены методом интегральных преобразований Лапласа, использование которого для решения линейных уравнений параболического типа (к которым относится уравнение нестационарной фильтрации жидкости) обосновано в специальной математической литературе. Полученные решения в частных случаях совпадают с известными в литературе результатами. Вследствие вышесказанного, научные положения и выводы автора по результатам проведенных исследований являются достоверными и обоснованными.

**Содержание диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 117 страниц.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования. Приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, указана их научная новизна, практическая значимость и достоверность.

**В первой главе** выполнен обзор теоретических исследований по изучению нестационарной фильтрации в пластовых системах с трещинами гидроразрыва. Выполненный обзор формирует ясное представление о текущем состоянии исследований в рассматриваемой области, подтверждает актуальность более глубокого изучения нестационарных моделей в пластах с трещинами гидроразрыва.

**Во второй главе** приводятся решения первой и второй краевых задач нестационарной фильтрации жидкости в рамках модели трещины гидроразрыва неограниченной протяженности. Решения задач построены методом интегрального преобразования Лапласа.

При решении первой краевой задачи (на скважине задано давление) использованы разные способы вычисления оригинала по изображению: теорема Меллина и общие правила преобразования Лапласа. Примечательно, что при этом получены выражения для давления, которые тождественны, но имеют абсолютно разные формы записи.

Как частный случай рассмотрено решение задачи для билинейного режима течения в системе пласт-трещина ГРП в приближении несжимаемости трещины и насыщающего ее флюида.

Из решения первой краевой задачи определена формула для дебита скважины в зависимости от времени и фильтрационных характеристик пласта, трещины и жидкости.

Получена формула, определяющая долю в дебите скважины объема жидкости, поступающего в трещину из пласта. Эта формула определяет зависимость дебита скважины от параметров пласта и трещины, от физических свойств флюида. Из этого выражения можно найти коэффициент продуктивности скважины.

Основной результат решения второй краевой задачи – это формулы для давления в трещине, в пласте и на забое скважины. Выражение для давления на забое скважины можно рассматривать как типовую кривую, которая используется при гидродинамических методах исследования скважин.

Получены аналитические формулы, определяющие кривые падения и восстановления давления в скважине при наличии трещины ГРП.

**В третьей главе** построены решения первой и второй краевых задач нестационарной фильтрации жидкости в системе пласт-трещина ГРП в рамках модели трещины конечной протяженности. При этом выражения для давлений определяются через бесконечные ряды. Эти ряды являются

альтернативным представлением полученных при переходе от изображений к оригиналам тета-функций и обладают хорошей сходимостью.

Рассмотрены частные случаи полученных решений имеющие самостоятельный интерес, в частности, формула для давления при фильтрации жидкости из пласта в трещину бесконечной проводимости.

В частных случаях показан переход к известной в теории фильтрации формуле давления в плоско-параллельном потоке; получено выражение для фильтрации жидкости в замкнутом пласте между галереей с заданным дебитом и непроницаемой линией сброса при заданной на галерее значении дебита; выражение для давления при линейной фильтрации жидкости из пласта в трещину бесконечной проводимости при отборе жидкости из скважины с заданным дебитом.

Получена формула для определения зависимости давления на забое скважины. При проведении гидродинамических исследований скважин эту формулу можно рассматривать как типовую кривую, определяющую зависимость забойного давления от времени и параметров пласта, трещины и фильтрующейся жидкости.

На основе численных расчетов по полученным формулам приведены графики зависимости давления вдоль трещины, зависимости забойного давления от времени при различных значениях определяющих модель параметров.

**В четвертой главе** рассмотрена модель нестационарной фильтрации жидкости, в случае когда в призабойной зоне внутри трещины имеется скин-зона пониженной проницаемости. При этом для давления в трещине, на линии ее смыкания со скважиной, использовано граничное условие третьего рода, которое моделирует наличие скин-зоны. Рассмотрены частные случаи, имеющие самостоятельный интерес: плоско-параллельный фильтрационный поток из пласта к галерее или к трещине ГРП бесконечной проводимости при наличии скин-зоны соответственно на галерее или на боковой поверхности

трещины. Приведен сравнительный анализ дебита при наличии и отсутствии скин-зоны.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

#### **Замечания по содержанию диссертации.**

По сути выполненной диссертантом работы замечаний нет. Есть вопросы, которые возникают при прочтении диссертации и косвенно касаются её, и не только её. В частности, расчеты выполнены для трещин гидроразрыва размерами 10\*100 м. Как получить такую трещину, как разорвать пласт, не затронув окружающие породы? А если окружающие породы порваны и пропант закачан в полученную трещину, то течение в трещине уже трудно представить одномерным, так как линии тока в трещине выйдут за пределы пласта. Какова будет при этом погрешность выполненной идеализации пласт-трещина-скважина?

**Заключение.** Диссертационная работа Хисамова Артура Альфировича «Аналитическое исследование нестационарной фильтрации жидкости в системе пласт-трещина гидроразрыва» выполнена на высоком научном уровне и является законченным научно-квалификационным исследованием, выполненном на актуальную тему, и соответствует области исследования научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Полученные результаты апробированы на международных, всероссийских и региональных конференциях. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ: 1 научная статья в рецензируемом научном издании, входящем в перечень Scopus, 3 научных статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень международных реферативных баз данных и RSCI, 3 научных статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 12 научных публикаций в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень РИНЦ.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию работы.

Диссертационная работа отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, **Хисамов Артур Альфирович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.1.9. Механика, жидкости, газа и плазмы**.

*Я, Никифоров Анатолий Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.*

Доктор физико-математических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник, заведующий  
Лабораторией математического моделирования  
процессов фильтрации ИММ ФИЦ КазНЦ РАН

А.И. Никифоров

Анатолий Иванович Никифоров

Ведущий научный сотрудник Института механики и машиностроения - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, профессор, академик РАН.

420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31.

Телефон: +79050201833.

E-mail: [nikiforovimm@mail.ru](mailto:nikiforovimm@mail.ru)

