

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Бобренёвой Юлии Олеговны** «Математическое моделирование массопереноса в коллекторах трещиновато-порового типа», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Структура запасов нефти постоянно смещается в сторону сложных геолого-геофизических условий, худших свойств добываемой продукции, наличия осложняющих разработку и добычу факторов. В ближайшие годы разработка таких запасов станет насущной необходимостью, ведь к ним относится значительная часть еще не введенных в эксплуатацию месторождений, а также перспективных ресурсов. Открытие и освоение в последние годы ряда новых крупных месторождений свидетельствуют о том, что роль карбонатных коллекторов в развитии нефтяной промышленности в России активно возрастает. На сегодняшний день в карбонатных коллекторах сосредоточено до 60% запасов нефти. Продуктивные пласты с коллектором данного типа, мало изучены по сравнению с обычным песчаником в терригенных пластах, так как каждая залежь такого типа индивидуальна и требует свои подходы к разработке.

В отличие от достаточно инертных минералов, из которых состоят терригенные отложения, карбонаты очень активно вступают в реакции. В результате протекающие в них вторичные процессы (засолонение, доломитизация, перекристаллизация, и др.) со временем меняют свойства породы и осложняют добычу нефти. В связи с этим процесс фильтрации жидкости отличается от массопереноса в терригенных коллекторах за счет появления «двойной среды» - каркаса (матрицы) и системы трещин. Для рациональной разработки нефтяных залежей важным является наличие качественной информации о фильтрационно-емкостных характеристиках коллектора, что связано с изучением особенностей фильтрации жидкостей в пластах. Это предполагает развитие существующих и разработку новых математических моделей, позволяющих моделировать процесс массопереноса во время гидродинамических исследований на добывающих скважинах. Существующие же программные продукты для анализа и интерпретации гидродинамических исследований не позволяют проводить полный спектр расчетов и не всегда вычислительно эффективны, что ограничивает круг решаемых задач по разработке.

Таким образом, создание вычислительных основ, комплексов программ для моделирования массопереноса в трещиновато-поровых коллекторах при проведении гидродинамических исследований является актуальной задачей.

В силу сказанного тема диссертационного исследования Ю.О. Бобренёвой **является актуальной.**

Диссертационная работа изложена на 129 страницах, содержит 47 рисунков и 4 таблицы; список цитируемой литературы включает 138 наименований. Работа состоит из введения, шести основных глав, выводов, а также включает список используемых сокращений.

В **первой главе** проведен обзор и анализ литературы в области неизотермической фильтрации в коллекторах трещиновато-порового типа, а также существующих методов численного исследования фильтрации. Рассмотрены модели двойной пористости различных авторов, изучены существующие подходы и современные программные комплексы для решения задачи фильтрации жидкости в карбонатных коллекторах при проведении гидродинамических исследований в добывающих скважинах. В ходе анализа выявлено, что основное развитие темы направлено на построение сложных гидродинамических моделей всего месторождения, что не эффективно для оперативных производственных задач в рамках мониторинга месторождения за энергетическим состоянием пласта, а именно проблем при проведении и интерпретации гидродинамических исследований на скважинах. Поэтому, возникает необходимость в создании быстросчетного инструмента, который позволит решать задачи оперативного планирования, возникающие при разработке месторождения, куда относится проведение экспресс-оценки требуемой длительности остановки перед исследованием, а также тщательное изучение поведения процессов флюидодинамики при различных параметрах пласта. Таким образом, создание вычислительных основ, комплексов программ для моделирования массопереноса при проведении гидродинамических исследований в трещиновато-поровых коллекторах является актуальной задачей на сегодняшний день и целью данной диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию физическо-математической модели процесса фильтрации однофазной жидкости в рамках модели двойной среды в коллекторе трещиновато-порового типа при проведении гидродинамического исследования на неустановившемся режиме течения в добывающей скважине. В модели учитываются геометрические размеры блоков, на которые разбивается пористая часть коллектора. Рассмотрены случаи, когда скважина во время исследования останавливается и закрывается на забое и когда перекрывается только на устье, в связи с чем возникают

такие процессы как влияние ствола скважины и скин-эффект. С учетом рассматриваемых эффектов меняются граничные условия. Для модели процесса фильтрации построено аналитическое решение, представленное в литературе. Для построенной системы дифференциальных уравнений известны асимптотические решения, которые не всегда могут быть применены для решения практически значимых задач. В связи с этим будет рассматриваться численное решение задачи.

В **третьей главе** представлены методы решения рассмотренных систем дифференциальных уравнений второго порядка. Для решения выбран метод конечных разностей. Расписаны явная и неявная разностные схемы для рассмотренных математических моделей на равномерной сетке. Для математической модели были записаны граничные условия специального вида, которые учитывают влияние процессов, происходящих в стволе скважины при ее остановке и закрытии на гидродинамическое исследование. Представлена дискретизация граничных условий до второго порядка точности. При решении задачи с граничными условиями первого порядка точности получены погрешности в результатах, которые допустимы для практических задач. Для решения полученных схем применялся метод матричной прогонки. Разработан интерфейс для моделирования полей давления при проведении гидродинамических исследований на неустановившемся режиме течения в коллекторе трещиновато-порового типа. Программный модуль предусматривает возможность задания различных входных параметров и граничных условий. В разработанном программном модуле проведено численное моделирование давления во времени и пространстве в коллекторе трещиновато-порового типа во время остановки скважины. Построены кривые восстановления давления для разных проницаемостей сети трещин. Для кривых давления построены производные Бурде в двойных логарифмических координатах. По построенным производным проведен анализ результатов.

В **четвертой главе** представлено описание физической и математической модели фильтрации двухфазной жидкости в рамках модели двойной пористости в коллекторе трещиновато-порового типа при проведении гидродинамического исследования скважины неустановившемся режиме течения. Поставленная задача является сложной квазилинейной системой уравнений математической физики смешанного типа. Модель включает в себя систему гиперболических уравнений относительно переноса насыщенностей на фоне фиксированных скоростей фильтрации, и систему, содержащую уравнения пьезопроводности для определения давления. При решении такой системы возникает ряд трудностей, которые, во-первых, связаны с большим количеством переменных и, во-вторых, характер нелинейности уравнений таков, что соответствующая

линеаризованная система в ряде случаев уже не обладает свойством самосопряженности пространственных дифференциальных операторов. Для решения системы исходных уравнений применяется метод расщепления по физическим процессам: перенос насыщенностей и перераспределение давления. Такое преобразование позволило реализовать эффективный численный алгоритм для рассматриваемой задачи, который дал возможность производить расчеты с крупным шагом по времени и с меньшим количеством неизвестных параметров. Представлен алгоритм решения преобразованной задачи.

В пятой главе представлена численная модель процесса фильтрации двухфазной жидкости в рамках модели двойной пористости в коллекторе трещиновато-порового типа. Полученная расщепленная модель эквивалентна консервативной разностной аппроксимации для исходных уравнений, записанных в дивергентной форме, благодаря введению специальной аппроксимации сеточных функций по времени. При этом по сравнению с полностью неявной схемой решаются две системы уравнений меньшей размерности (по давлениям и насыщенностям) вместо одной. Выявлено, что такой подход, когда система расщепляется по физическим процессам и обе группы уравнений решаются неявно, алгоритм обеспечивает надежность расчета в исследованном диапазоне параметров и приемлемое быстродействие, что вполне устраивает при решении практических задач. Построены коэффициенты системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для расчета давлений и насыщенностей. Для решения СЛАУ применялся метод скалярной прогонки. Программный модуль реализован на языке C++. В разработанном модуле проведено численное моделирование динамики забойного давления и насыщенностей во времени и по пространству в коллекторе трещиновато-порового типа для работающей добывающей скважины. Построены и проанализированы кривые давления и насыщенностей для разных случаев.

Шестая глава посвящена проведению тестирования математических моделей на примере реального карбонатного месторождения трещиновато-порового типа – им. Р. Требса. Было выбрано одно из крупных месторождений России, разработка которого имеет дополнительные трудности в виде сложного строения залежи, климатических условий и далекого месторасположения и финансовые затраты. На основании начальных параметров, характерных для рассматриваемого месторождения, была построена математическая модель для гидродинамического исследования методом кривой восстановления давления на добывающей скважине. В результате была получена необходимая длительность остановки скважины на исследование, которая не влечет за собой дополнительные потери по нефти. Представлены кривые изменения давления в

зависимости от радиуса на разные промежутки времени, показывающие поведение давления вокруг скважины в момент исследования.

Перечислим наиболее важные результаты, обладающие **научной новизной**.

1. Построена новая флюидодинамическая модель в трещиновато-поровом коллекторе в рамках модели типа «двойной среды» для описания гидродинамических исследований на неустановившихся режимах течения в добывающей скважине с учетом влияния процессов, которые возникают при остановке и закрытии скважины.

2. Разработаны новые эффективные вычислительные алгоритмы для решения полученных систем уравнений модели, которые обеспечивающих корректность и согласованность потоков между системой трещин и поровым коллектором.

3. Разработан программный комплекс для моделирования гидродинамического исследования на неустановившемся режиме течения в добывающей скважине в случае однофазной и двухфазной фильтрации жидкости в коллекторе трещиновато-порового типа.

4. Проведены вычислительные эксперименты исследований динамики давления и насыщенности в зависимости от значений проницаемости, влияния ствола скважины и скин-фактора. Рассчитано оптимальное время длительности остановки скважины с минимальными потерями по добыче, необходимое для проведения гидродинамического исследования на неустановившемся режиме для реального карбонатного месторождения.

Достоверность гарантируется строгостью используемого математического аппарата и подтверждается сравнением результатов численного моделирования с промысловыми данными, а также данными вычислительных экспериментов, выполненных известными численными методами.

По диссертации имеются следующие **вопросы и замечания**.

1. Применение термина «массоперенос» к задаче, представленной уравнением вида «диффузии» в полярной системе координат, не совсем удачен. Уравнение переноса описывает транспорт изучаемой субстанции за счет конвективного движения среды, а в данной задаче он отсутствует (равен нулю).

2. Отсутствует сопоставление результатов расчетов, выполненных на основе явной и неявной разностных схем, для задачи массопереноса в зависимости от выбора шага по времени. Не приведены оценки погрешности решения этой задачи в зависимости от выбора шага по времени.

3. Не выполнена проверка консервативности модели массопереноса при ее дискретизации неявной схемой вида (3.11) с аппроксимацией граничных условий согласно равенствам (3.20) и (3.23).

4. Аппроксимация (3.23), выполненная на основе разложения неизвестной функции в ряд Тейлора, не учитывает радиус контура питания r_e . Не понятно чем представление граничного условия на внешнем контуре расчетной области отличается от аппроксимации плоской границы. Данную аппроксимацию следовало бы выполнить на основе интегро-интерполяционного метода, также как и на левой границе.

5. Для одномерной задачи с уравнением, которое может быть отнесено к типу уравнений «теплопроводности», относительная погрешность достаточно велика, ее значение составило 5-7%.

Указанные замечания не снижают существенным образом общую **положительную** оценку работы Ю.О. Бобренёвой. Материал диссертационной работы изложен логически последовательно и грамотно оформлен. Каждая глава заканчивается заключением, содержащим основные выводы. Все основные результаты работы являются обоснованными и корректно сформулированными. Автореферат диссертации Ю.О. Бобренёвой полностью соответствует содержанию диссертации. По материалам диссертации опубликовано 24 научных работы, из них: 3 статьи в центральных научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 7 статей в изданиях, индексируемых Scopus, 14 – в других рецензируемых изданиях, в том числе тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда.


Диссертационная работа соответствует специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, пункту 3 – «Алгоритмы и методы компьютерного моделирования на основе результатов натуральных экспериментов» (Математическая модель в трещиновато-поровом коллекторе в рамках модели типа «двойной среды» для описания гидродинамических исследований на неустановившихся режимах течения в добывающей скважине); пункту 5 – «Эффективные вычислительные методы и алгоритмы с применением современных компьютерных технологий» (эффективные вычислительные алгоритмы, которые обеспечивают корректность и согласованность потоков между системой трещин и поровым коллектором); пункту 6 – «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»

(программный комплекс для моделирования гидродинамического исследования на неустановившемся режиме течения в добывающей скважине в случае однофазной и двухфазной фильтрации жидкости в коллекторе трещиновато-порового типа); пункту 7 – «Проблемно-ориентированные коды и вычислительные эксперименты. Сравнение результатов вычислительных экспериментов либо с результатами натуральных экспериментов, либо с результатами анализа математических моделей» (Вычислительные эксперименты по исследованию динамики давления и насыщенности в зависимости от значений проницаемости, влияния ствола скважины и скин-фактора).

Таким образом, диссертация Бобренёвой Юлии Олеговны является научно-квалификационной работой, в которой изложена новая научно-обоснованная математическая модель массопереноса двухфазной жидкости в коллекторе трещиновато-порового типа, имеющая несомненную научную значимость в развитии математического моделирования сложных процессов флюидодинамики, на основе которой решена задача расчёта оптимального времени остановки скважины с минимальными потерями по добыче при проведении гидродинамического исследования, что вносит значительный вклад в изучение нефтяных пластов при их испытании, освоении и эксплуатации, и имеет существенное значение для развития страны.

Диссертационная работа Бобренёвой Юлии Олеговны «Математическое моделирование массопереноса в коллекторах трещиновато-порового типа» по актуальности, научной новизне и практической значимости основных результатов соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – Ю.О. Бобренёва заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Доктор ф.-м. н., профессор кафедры
программного обеспечения вычислительной
техники и автоматизированных систем
Донского государственного технического
университета


_____ А.Е. Чистяков
Дата « 28 » 10 2022 г.

Чистяков Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Донской государственный технический университет. Адрес: 344000, Ростов-на-Дону, Площадь Гагарина, 1. Телефон: +7 (950) 859-38-72, e-mail: cheese_05@mail.ru

Подпись Чистякова А.Е. удостоверяю

