

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.

Актуальность темы диссертации

Нефтегазовая промышленность на сегодняшний день является важнейшей составляющей мировой экономики и оказывает значительное влияние на развитие других отраслей. Россия занимает лидирующие позиции в нефтяной промышленности. Перспективы развития нефтяной отрасли требуют решения различных вопросов, среди которых одним из главных является разработка и эффективное освоение месторождений. Если для традиционных коллекторов разработано огромное количество подходов разработки, то для коллекторов, относящихся к карбонатным, а именно трещиновато-поровым, все еще остаются нерешенные вопросы. Интерес и сложность изучаемого объекта заключается в наличии пустотного пространства в виде трещин и каверн, что требует новых подходов к разработке таких залежей. Основными задачами в данном направлении являются выделение пластов и залежей, подсчет запасов, проектирование системы разработки месторождения, моделирование различных геолого-технологических мероприятий и т.д. Точность и качество выполнения перечисленных выше задач напрямую зависит от степени изученности разрабатываемого объекта. На данном этапе очень важно понимать фильтрационные особенности коллектора, характер движения жидкостей в пласте. На сегодняшний день одним из эффективных методов, позволяющим изучить свойства пласта, является гидродинамическое исследование скважин (ГДИС).

Для классических моделей фильтрации в коллекторах типа «одинарной среды» разработаны эффективные алгоритмы, как для моделирования процессов фильтрации, так и для интерпретации данных ГДИС с целью идентификации параметров моделей. Однако ситуация сильно усложняется в случае применения моделей типа «двойной среды». Используемые программные продукты для анализа ГДИС (как отечественные, так и зарубежные) не позволяют получить достаточно полный спектр расчетов, необходимый для принятия оперативных решений, возникающих на практике. Поэтому возникает необходимость в создании быстросчетного инструмента, который позволит решать задачи

оперативного планирования, возникающие при разработке месторождения, к числу которых относится проведение экспресс-оценки требуемой длительности остановки скважины перед исследованием, а также тщательное изучение фильтрационных течений при различных параметрах пласта.

Структура диссертации и основные результаты работы

Текст диссертационной работы изложен на 129 страницах и содержит введение, шесть глав, выводы, список источников из 138 наименований и список используемых сокращений, включает 47 рисунков и 4 таблицы.

Во введении описана актуальность работы, поставлены цель и задачи исследования, описана научная новизна, достоверность и обоснованность результатов.

В **первой главе** представлен обзор и анализ литературы классических и современных, отечественных и зарубежных авторов в области подземной гидродинамики, а именно процессов фильтрации при проведении гидродинамических исследований в коллекторах трещиновато-порового типа. Рассмотрены основные проблемы и сложности, возникающие при изучении массопереноса в коллекторах данного типа. Рассмотрены предложенные различными авторами модели типа «двойной среды», изучены существующие подходы и современные программные комплексы для моделирования фильтрации жидкости в карбонатных коллекторах.

Во **второй главе** описывается физико-математическая модель процесса фильтрации однофазной жидкости в рамках модели «двойной среды» в коллекторе трещиновато-порового типа при проведении гидродинамического исследования методом кривой восстановления давления в добывающей скважине. В этой модели учитываются геометрические размеры блоков, на которые разбивается поровая часть коллектора. Рассмотрены такие процессы, возникающие при закрытии скважины на исследование, как влияние ствола скважины и скин-эффект. Для модели процесса фильтрации построено аналитическое решение, представленное в литературе, на основе которого сделаны выводы, что аналитическое решение для практических задач не всегда может быть применено. В связи с этим будет рассматриваться численное решение задачи.

В **третьей главе** представлено описание вычислительного алгоритма для численного интегрирования методом конечных разностей системы уравнений, описывающей фильтрационные течения в рассматриваемых средах. Расписаны явная и неявная разностные схемы, аппроксимирующие уравнения рассматриваемых математических моделей на равномерной сетке. Представлена дискретизация граничных

условий с первым и вторым порядком точности. При решении задачи с граничными условиями первого порядка точности получены погрешности в результатах, которые допустимы для практических задач. Для решения возникающих систем линейных уравнений применялся метод матричной прогонки. Разработан и реализован программный модуль, с помощью которого проведено численное моделирование эволюции поля давления при однофазной фильтрации в коллекторе трещиновато-порового типа во время остановки скважины. Построены кривые восстановления давления для разных проницаемостей сети трещин. Представлен анализ и выводы по полученным результатам.

В **четвертой главе** представлено описание физической и математической модели двухфазной фильтрации в рамках модели «двойной среды» в коллекторе трещиновато-порового типа при проведении гидродинамического исследования скважины. Полученная модель включает в себя систему уравнений, гиперболическую относительно переноса насыщенностей и параболическую относительно давления. Для решения этой системы уравнений применяется метод расщепления по физическим процессам. Такой подход позволил разработать и реализовать эффективный вычислительный алгоритм для рассматриваемой задачи. Представлен алгоритм решения расщепленной задачи.

В **пятой главе** представлена численная модель процесса фильтрации двухфазной жидкости в рамках модели двойной пористости в коллекторе трещиновато-порового типа. Благодаря использованию специальной аппроксимации сеточных функций по времени, полученная расщепленная модель эквивалентна консервативной разностной аппроксимации для исходных уравнений, записанных в дивергентной форме. При этом в отличие от полностью неявной схемы вместо одной системы уравнений большой размерности решаются две системы меньшей размерности. Отмечено, что такой подход обеспечивает надежность расчета и приемлемое быстродействие при решении практических задач. Разработан и реализован программный модуль, с помощью которого проведено численное моделирование эволюции полей давления и насыщенностей в коллекторе трещиновато-порового типа для работающей добывающей скважины. Построены и проанализированы кривые давления и насыщенностей для разных случаев.

В **шестой главе** приведен анализ результатов работы разработанного программного комплекса на основе промысловых данных, полученных с карбонатного месторождения. А именно, рассчитано оптимальное время остановки на гидродинамическое исследование методом кривой восстановления давления на добывающей скважине, которое необходимо для минимизации потерь по добыче. Построены и проанализированы кривые давления в зависимости от времени и расстояния от скважины при проведении гидродинамического исследования.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Научная значимость диссертационной работы

Диссертационная работа обладает научной новизной в областях физики, связанных с исследованием механики сплошных сред, а именно с массопереносом в коллекторах трещиновато-порового типа. Новизна заключается в построении флюидодинамической модели 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. Для решения системы уравнений, описывающих построенную модель, предложены новые эффективные вычислительные алгоритмы, которые обеспечивают корректность и согласованность потоков между системой трещин и поровым коллектором. Разработан и реализован программный комплекс для численного моделирования однофазной и двухфазной фильтрации в коллекторе трещиновато-порового типа гидродинамического. Программный комплекс применен для гидродинамического исследования на неустановившемся режиме течения в добывающей скважине.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая ценность работы не вызывает сомнений, поскольку результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при решении реальных практических задач в области гидродинамических исследований на добывающих скважинах, что и было продемонстрировано автором.

Обоснованность и достоверность представленных в диссертации результатов, публикации

Достоверность подтверждается хорошей согласованностью результатов расчетов, выполненных с помощью разработанного автором программного комплекса, с промысловыми данными, а также с аналитическим решением, полученным другими авторами. Также стоит отметить, что все математические формулы, приведенные в диссертации, сопровождаются подробными выводами.

Замечания и вопросы по диссертации

1. Во второй главе в формуле (2.10) не прокомментирован коэффициент 18.41.

2. В разделе 3.2 описание алгоритма матричной прогонки сделано слишком схематично. В частности, не понятно, какой смысл имеют коэффициенты α_n, β_n , и где они затем используются. Было бы полезно выписать прогоночные «коэффициенты» α_1, β_1 .

3. При тестировании разработанного программного комплекса и проведении расчетов нигде не указана подробность расчетной сетки.

4. В модели представленной уравнениями (4.1), (4.3) и (4.6), (4.7) учитывается фильтрационный поток в матрице, которым затем пренебрегают. Уместно было бы сразу рассматривать систему уравнений (4.9), численному интегрированию которой посвящена глава 4. Ни в главе 4, ни в главе 5 не указано, как плотность флюидов зависит от давления.

5. В работе используются пространственные операторы $\nabla, \text{div}, \text{grad}$ и их многочисленные разностные аналоги. Так как рассматриваемые в диссертации задачи одномерны, можно было обойтись только оператором $\frac{\partial}{\partial r}$.

Отмеченные замечания не являются существенными, носят редакционный характер и не снижают общей ценности диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней»

Диссертация Бобренёвой Ю.О. «Математическое моделирование массопереноса в коллекторах трещиновато-порового типа», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, выполнена на высоком научно-техническом уровне и является законченной научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований, получено решение научной задачи моделирования процессов массопереноса в коллекторах трещиновато-порового типа. Результаты работы имеют значение для планирования гидродинамических методов исследования скважин на неустановившихся режимах фильтрационных течений в коллекторах трещиновато-порового типа.

Диссертационная работа соответствует специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, пункту 1 – «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений» (Математическая модель в трещиновато-поровом коллекторе в рамках модели типа «двойной среды» для описания гидродинамических исследований на неустановившихся режимах течения в добывающей скважине); пункту 4 – «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного

эксперимента» (Программный комплекс для численного моделирования гидродинамического исследования скважины на неустановившемся режиме фильтрационного течения в коллекторе трещиновато-порового типа); пункту 5 – «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» (Вычислительные эксперименты по исследованию эволюции полей давления и фазовых насыщенных в зависимости от значений проницаемости, характеристик ствола скважины и скин-фактора). Автореферат диссертации Ю.О. Бобренёвой составлен с соблюдением установленных требований и полностью соответствует содержанию диссертации. Результаты работы полностью опубликованы.

Таким образом, диссертационная работа удовлетворяет паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а также соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Бобренёва Юлия Олеговна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по искомой специальности.

Отзыв составил официальный оппонент

Колдоба Александр Васильевич

доктор физико-математических наук,

заведующий кафедрой моделирования и технологий

разработки нефтяных месторождений МФТИ (НИУ)


141701, Московская область, г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

рабочий телефон +7 (915) 254-63-51,

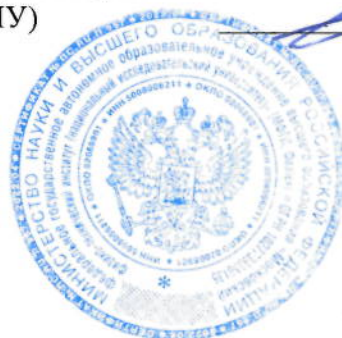
e-mail: koldoba@rambler.ru

«14» ноября 2022 г.

 А.В. Колдоба

Подпись Колдобы Александра Васильевича удостоверяю

Учёный секретарь Учёного совета МФТИ (НИУ)



 Е.Г. Евсеев