

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук

Соболевой Елены Борисовны

на диссертационную работу

Блонского Артема Вадимовича

**«Математическое моделирование течений в системах трещин»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 05.13.18 – «математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ»**

Диссертационная работа А.В. Блонского «Математическое моделирование течений в системах трещин» посвящена разработке физико-математической модели, описывающей течения однофазной и двухфазной жидкой среды по системам трещин в твердой породе, созданию вычислительного кода и его применению для решения ряда задач как в модельных, так и в реалистичных постановках. В частности, проводится исследование процессов двухфазного вытеснения в зависимости от капиллярных сил, смачиваемости породы, величины раскрытия трещин и наличия каверн на пересечениях трещин.

Актуальность работы. Подавляющее большинство геологических сред, в том числе флюидонасыщенных, являются трещиноватыми по структуре. Наличие трещиноватости может существенно влиять на характер и параметры течения жидкостей в таких средах. Учет влияния структуры геологической среды является сложной задачей, связанной с наличием целого комплекса специфических физических эффектов - взаимного расположения трещин, шероховатости их поверхности, взаимодействия флюидов с твердым скелетом и целого ряда других. Вместе с тем актуальной является задача создания инструментов математического моделирования (математических моделей, вычислительных алгоритмов и соответствующих комплексов программ) течений в трещиноватых средах, которые широко востребованы в различных областях человеческой деятельности, в частности, в технологиях разработки нефтегазовых месторождений, захоронения радиоактивных отходов и углекислого газа.

Диссертационная работа А.В. Блонского направлена на решение ряда задач, возникающих при математическом моделировании течений в трещиноватых системах. Последовательно приводятся гидродинамические модели, в том числе с учетом дополнительных факторов, эффективные вычислительные алгоритмы и описывается программная реализация для исследуемого класса течений. Демонстрируются результаты выполненных численных расчетов, в том числе тестов, которые показывают применимость разработанных подходов для решения задач в реалистичных постановках.

Тем самым, диссертационная работа А.В. Блонского посвящена актуальной как с теоретической, так и с практической точки зрения теме.

Научная новизна полученных результатов. Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми. В частности, разработана физико-математическая модель однофазных и двухфазных течений в системе трещин, которая учитывает наличие каверн на пересечениях трещин, что не рассматривалось ранее в аналогичных работах. Разработаны новые вычислительные алгоритмы решения модельной системы уравнений, которые реализованы в виде программного комплекса. Представлены результаты моделирования, которые показывают, что в рамках предложенной гидродинамической модели структура проводящих каналов в трещинах, капиллярные силы, смачиваемость породы и наличие каверн на пересечениях трещин могут оказывать существенное влияние на характер и показатели вытеснения в трещиноватых коллекторах.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 99 страницах, содержит 43 иллюстрации и 3 таблицы. Список литературы содержит 50 наименований.

Во введении диссертации представлены результаты литературного обзора, которые включают описания особенностей строения трещиноватых и трещиновато-поровых коллекторов, а также основных процессов, определяющих течение. Описаны ключевые особенности, которые необходимо учитывать при моделировании течений на различных пространственных масштабах. Определена актуальность задачи моделирования течений в трещиноватых коллекторах. Сформулированы цель, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе описаны современные подходы к моделированию течения жидкости в трещиноватых коллекторах. Проанализированы трехмерные модели однофазных и двухфазных течений в системе трещин с кавернами, которые образованы на линиях пересечения трещин. Рассмотренные модели учитывают, что трещины могут располагаться в пространстве произвольным образом и пересекаться друг с другом. Сформулирована система уравнений для описания течения в трещинах и вдоль каверн, учитывающая переток между трещинами и кавернами, сжимаемость жидкостей, гравитационные и капиллярные силы.

Во второй главе описаны алгоритмы построения треугольной сетки для системы трещин, согласованной на пересечениях трещин. Представлены вычислительные алгоритмы для решения уравнений модели. Описанные алгоритмы построены на основе метода конечных элементов/конечных объемов.

В третьей главе приведено описание разработанного программного комплекса и программных библиотек, использованных при разработке.

В четвертой главе представлены результаты моделирования течений в системах трещин с кавернами, которые демонстрируют эффективность разработанных алгоритмов, влияние структурных особенностей расположения трещин, наличия каверн на

пересечениях, капиллярных сил, а также свойств жидкостей на динамику вытеснения нефти водой в системе трещин.

В заключении приведены основные результаты работы.

Степень обоснованности научных положений и выводов диссертационной работы не вызывает сомнений. Автор использует обоснованные теоретические подходы. Корректность построенных автором математических моделей и применимость предлагаемых вычислительных алгоритмов подтверждена как обоснованными теоретическими соображениями, так и тестовыми расчетами. Результаты исследований опубликованы в рецензируемых изданиях, в том числе, входящих в перечень ВАК.

Практическая и научная ценность результатов работы заключается в разработанной физико-математической модели течения жидкости по системам трещин с кавернами, разработанных вычислительных алгоритмах и созданном программном комплексе, который позволяет моделировать течения в системах трещин с кавернами. Практическая ценность работы обусловлена тем, что полученные результаты, в том числе созданное программное обеспечение, могут быть применены для анализа течений в трещиноватых коллекторах нефти и газа.

Соответствие содержания диссертации специальности. Содержание и результаты работы полностью соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, поскольку основными результатами работы являются: математическая модель течения жидкости в системе трещин с кавернами, вычислительные алгоритмы решения уравнений модели, а также программная реализация построенных вычислительных алгоритмов в виде программного комплекса.

Замечания по работе. В качестве недостатков диссертационной работы можно отметить следующее.

- 1). В диссертации говорится, что в модели учитывается сжимаемость жидкостей. Однако, стоит отметить, что рассматриваемые в работе жидкости - вода и нефть - являются слабосжимаемыми, их плотность меняется мало в зависимости от давления (зависимость плотности от температуры вообще не рассматривается – среда считается изотермической). Возникает вопрос: чем обусловлена необходимость учитывать сжимаемость в случае таких жидких сред? Может быть, достаточно использовать более простую модель несжимаемой жидкости? В работе нет обстоятельного ответа на эти вопросы.
- 2). При моделировании двухфазного течения в системе трещин использовано лишь одно значение вязкости нефти 2,4 сП, которое соответствует маловязкой нефти. Однако известно, что этот параметр в реальных условиях может меняться в широком диапазоне в зависимости от геологических условий, достигая 200 сП и выше в случае

высоковязкой нефти. Скорость течения в трещинах обратно пропорциональна вязкости, поэтому этот параметр является важным для определения динамики течения в целом. Было бы целесообразно провести расчеты при различных значениях вязкости.

- 3). При представлении результатов расчета на графиках в последовательные моменты времени следовало бы указать значения времени, чтобы оценить временной масштаб вытеснения нефти водой. Это относится в первую очередь к Рис. 4.14, 4.16, 4.23.

Общая оценка работы. Приведенные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Рассматриваемые в работе задачи являются актуальными. Постановка и методы решения задач ясно изложены и обоснованы. Результаты работы обладают научной новизной и практической ценностью. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа А.В. Блонского является законченным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям, выполненным по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, – соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН.

28 февраля 2019 г.



Соболева Елена Борисовна

Адрес организации: 119526 ГСП-1, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1.

Телефон: +7 (495) 434-32-83,

e-mail: soboleva@ipmnet.ru

Личную подпись доктора физико-математических наук Соболевой Елены Борисовны заверяю.

Ученый секретарь ИПМех РАН
к.ф.-м.н.



М.А. Котов