

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
международной работе
ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина,
д.т.н., профессор



_____ А.Ф. Максименко

« 08 » июня 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе
Маркова Павла Владимировича
«Исследование и применение дискретных моделей фильтрации
на различных масштабах пористой среды»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 –
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы выполненной работы

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена развитию методов математического моделирования процессов фильтрации на микромасштабе пористой среды и ремасштабированию результатов на макромасштаб, разработке численных алгоритмов и методов ускорения расчетов, а также созданию соответствующего комплекса программ. Актуальность тематики исследований обусловлена прежде всего ключевой ролью математического моделирования пластовой системы в проектировании разработки нефтяных и газовых месторождений, что подразумевает построение различных численных моделей фильтрации, являющихся дискретными аналогами дифференциальных уравнений. Необходимость проведения многовариантных детальных расчетов за ограниченное время требует развития методов ускорения построения решений. Изучаемые процессы в пористой среде являются многомасштабными, что требует создания и развития подходов, позволяющих моделировать процессы на микромасштабе и учитывать их влияние на фильтрационный перенос на макромасштабе

(масштаб залежи, месторождения). Этими обстоятельствами определяется важность рассматриваемых в диссертации задач микромасштабного моделирования и ремасштабирования полученных результатов на масштаб межскважинного пространства, как с точки зрения теоретического исследования, так и практического использования.

Цель и задачи исследований

Основной целью представленной диссертационной работы является исследование дискретных моделей пористых сред, описывающих процессы фильтрации на различных масштабах, и их взаимосвязей на одном и разных масштабах. Для достижения этой цели автором были решены следующие задачи:

- 1) Разработка метода ускорения получения численных решений при исследовании дискретных моделей фильтрации, основанного на теории непрерывных групп симметрий.
- 2) Нахождение классов дискретных моделей фильтрации, для которых применим метод размножения численных решений с помощью непрерывных групп симметрий.
- 3) Разработка подхода к ремасштабированию дискретных микромоделей пористой среды для их использования при расчете фильтрационных параметров дискретных макромоделей нефтяных и газовых месторождений.
- 4) Реализация разработанных методов в виде единого программного комплекса для моделирования процессов фильтрации.

Цель диссертации и решаемые задачи соответствуют современным тенденциям развития методов многомасштабного моделирования нефтегазоносных пластов и численных методов решения различных задач фильтрации с целью ускорения проводимых расчетов без снижения точности.

Структура работы

Диссертация Маркова П.В. логично структурирована и состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Общий объем работы составляет 190 страниц, включает 51 рисунок и 12 таблиц.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту. Также приведены сведения о научной новизне, практической и теоретической значимости, апробации результатов и основных публикациях, кратко изложено содержание диссертации по главам.

В первой главе дается описание и классификация дискретных моделей фильтрации в пористых средах, общий вид исследуемых дискретных моделей (разностные схемы, модели поровых сетей, дискретные динамические системы), описание используемых в работе понятий масштабов пористой среды (микромасштаб и макромасштаб), а также представляются различные взаимосвязи дискретных моделей в рамках одного и разных масштабов, которые исследуются в данной диссертации. Также приводится краткое описание проблем моделирования процессов фильтрации, на решение которых направлены разработанные в диссертации методы: ускорение численных расчетов и повышение обоснованности фильтрационных параметров с точки зрения микромасштаба пористой среды.

Во второй главе приводится введение в групповой анализ дискретных моделей с помощью непрерывных групп симметрий, а также описание использованного известного метода построения разностных схем с сохранением непрерывных групп симметрий исходных дифференциальных уравнений. Проводится представление результатов выделения классов разностных схем для дифференциальных уравнений фильтрации газа и Рапопорта-Лиса с непрерывными группами симметрий. Также представлены результаты выделения классов для двумерных и трехмерных дискретных динамических систем.

В третьей главе приводится разработанный метод размножения численных решений с использованием непрерывных групп симметрий и проводится анализ его точности. Для выделенных во второй главе классов разностных схем уравнений фильтрации газа и Рапопорта-Лиса даются примеры применения разработанного метода, сравнение полученных численных решений с известными точными решениями с целью анализа рассматриваемых разностных схем и разработанного метода размножения численных решений. Также приводятся примеры применения полученных классов дискретных динамических систем при исследовании различных дискретных моделей процессов фильтрации.

В четвертой главе представлена классификация дискретных микромоделей пористой среды (поромасштабные модели), методы их получения и моделирования многофазного течения. Также приводится классификация проблем применения различных видов поромасштабных моделей при построении гидродинамических моделей месторождений нефти и газа и обосновываются преимущества использования моделей поровых сетей в данной диссертационной работе. В конце главы дается запись уравнений для моделей поровых сетей в общем виде, представленном в первой главе для дискретных моделей, показаны примеры применения результатов второй и третьей главы.

В пятой главе представлен подход к ремасштабированию микромоделей пористой среды для расчета фильтрационных параметров, используемых на макромасштабе месторождений нефти и газа. В рамках этого подхода представлены методы стохастической генерации моделей поровых сетей на основе заданных распределений их параметров, метод решения обратных задач для моделей поровых сетей, метод выделения регионов пласта с характерными моделями поровых сетей. Приводится сравнение с аналогичными методами и результаты тестовых расчетов на реальных данных месторождений нефти и газа.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в работе. Результаты исследований отражены в защищаемых положениях и полностью их обосновывают.

В приложениях приведены описание разработанного комплекса программ, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и документы о внедрении разработанных методов и программного комплекса.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием известных методов группового анализа, групповых классификаций дифференциальных уравнений фильтрации и известного метода получения разностных схем с сохранением непрерывных групп симметрий; сравнением полученных численных решений с известными точными решениями соответствующих уравнений; проведением тестовых сравнительных расчетов с использованием экспериментальных данных; согласованностью отдельных выводов диссертации с результатами известных работ, опубликованных другими авторами.

К **основным результатам диссертационной работы, обладающим научной новизной**, относятся следующие:

1. Впервые с помощью непрерывных групп симметрий исследованы дискретные модели фильтрации и получены классы дискретных моделей, для которых применим разработанный метод размножения численных решений: двумерные и трехмерные дискретные динамические системы, разностные схемы для уравнений Рапопорта-Лиса и фильтрации газа.
2. С использованием непрерывных групп симметрий разработан оригинальный метод размножения численных решений для систем уравнений дискретных моделей фильтрации.

3. Разработан метод построения моделей поровых сетей, позволяющий строить стохастические модели на основе независимой генерации параметров по их распределениям и с учетом их взаимосвязей.
4. Разработан оригинальный подход к ремасштабированию дискретных микромоделей на макромасштаб залежи путем ее разбиения на регионы с характерными моделями поровых сетей. Этот подход реализован в виде единого программного комплекса.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в применении теории непрерывных групп симметрий к исследованию дискретных моделей фильтрации и разработке нового метода размножения численных решений с использованием дискретных моделей (например, инвариантных разностных схем) и их непрерывных групп симметрий; развитии подходов к моделированию поровых сетей и использованию его результатов на макромасштабе.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что ее результаты могут быть применены при проектировании разработки нефтяных и газовых месторождений для создания микромоделей расчета фильтрационных характеристик многофазного потока (фазовые проницаемости и капиллярное давление) и переноса этих результатов в модель пласта; разработанные методы размножения численных решений позволят значительно ускорить проведение многовариантных расчетов для уравнений фильтрации газа и уравнения Рапопорта-Лиса для определенных случаев коэффициентов этих уравнений, в частности, при применении различных упрощенных подходов моделирования разработки месторождений нефти и газа на основе этих видов уравнений. Разработанный автором программный комплекс может использоваться для решения ряда практических задач.

Диссертационная работа Маркова Павла Владимировича основана на результатах, полученных в процессе исследования различных видов дискретных моделей процессов фильтрации в пористых средах с целью повышения скорости численных расчетов и переноса результатов поромасштабного моделирования на масштаб нефтегазоносных пластов. Автором разработаны методы, алгоритмы и программные модули, выполняющие все необходимые расчеты, выполнен анализ существующих аналогичных методов и проведено сравнение с ними для разработанных методов, а также проведено тестирование разработанных методов. Все материалы, привлеченные автором из открытых источников, сопровождаются корректными ссылками.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Целесообразно продолжить работу в данном направлении с целью более комплексного подхода к проблеме ремасштабирования результатов, учитывающего не только скважинные данные, но и другие источники информации и альтернативные методы исследований; большой интерес также представляет расширение видов разностных схем и практических случаев, для которых возможно ускорение получения численных решений с помощью непрерывных групп симметрий. Результаты диссертации, в частности, разработанный автором программный комплекс, могут рекомендоваться к использованию в научно-исследовательских и проектных институтах нефтегазовой отрасли.

Замечания

По работе имеются следующие вопросы и замечания, не снижающие общей ценности и значимости выполненного исследования:

1. В теореме 2 диссертационной работы проведена новая групповая классификация трехмерных дискретных динамических систем с трехпараметрической группой преобразований, основанная на классификации трехмерных алгебр Ли в статье Хабирова С. В. [153 в диссертации], которая отличается от общепринятой, поскольку рассматриваются алгебры Ли специального вида. На это следовало явно указать в тексте диссертации. Следовало также включить в текст диссертации примеры вычислений для построения семейств трехмерных динамических систем, представленных в таблице 2.2 аналогично тому, как это сделано для таблицы 2.1 в случае двумерных дискретных систем.
2. Для уравнения Баклея-Леверетта приведен пример построения динамической системы, которая имеет двухпараметрическую группу симметрии, но нет примера использования построенной разностной схемы, а также не рассматриваются вопросы аппроксимации, устойчивости и монотонности схемы, что важно для уравнения данного класса.
3. Метод размножения численных решений работает только для семейств уравнений с начальными и граничными условиями, которые связаны между собой преобразованиями из групп симметрии. В частности, в рассматриваемых примерах используются фазовые проникаемости и капиллярные кривые специального вида, допускающего использование метода. Непонятно, как

предполагается применять этот метод на макромасштабе, если на основе поровой сети или по данным керна будут получены зависимости фильтрационных параметров общего вида.

4. В разделе по исследованию точности метода размножения численного решения написано, что ошибки для полученных с использованием непрерывных симметрий решений зависят от ошибок вычислений на «реальном» компьютере и они стремятся к нулю, если используется сходящийся алгоритм и ошибки округления стремятся к нулю. Необходимо пояснить вывод о том, что общие ошибки могут контролироваться и даже быть снижены при генерации численных решений с использованием непрерывных групп симметрий.
5. Необходимо пояснить, в чем состоит новизна представленного в работе подхода к моделированию поровых сетей и соответствующего программного продукта по сравнению работами группы профессора Мартина Бланта (M. Blunt) кафедры Department of Earth Science & Engineering университета Imperial College London.
6. В работе отсутствует четкий анализ возможности и корректности описания течения флюидов в образце керна, который сам по себе характеризуется многомасштабной неоднородностью (тонкие поры, каверны, трещины), с помощью модели поровой сети, основанной на решении уравнений Навье-Стокса. С точки зрения механики сплошной среды некорректно говорить о моделях течения $6 \times 6 \times 6$ или $16 \times 16 \times 16$ пор и использовать эти результаты для перенесения на макромасштаб без специального анализа.
7. Для решения обратных задач адаптации моделей к фактическим данным, как правило, применяются те или иные оптимизационные алгоритмы, поэтому использование одного из них (метод роя частиц) не стоит относить к новизне полученных результатов.
8. Следовало бы подробнее остановиться на проблемах выделения регионов в межскважинном пространстве, использования скважинных данных здесь явно недостаточно.
9. Непонятно, для какой по размерам и свойствам области нужно получить исходное численное решение, чтобы можно было его корректно размножить на всю область нефтегазоносного пласта.

Заключение

Диссертационная работа Маркова Павла Владимировича «Исследование и применение дискретных моделей фильтрации на различных масштабах пористой среды» является законченной научно-квалификационной работой на актуальную тему, выполнена на высоком научном уровне, получены решения новых задач, имеющих важное практическое значение. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Автореферат диссертации в достаточной степени отражает содержание и суть исследования.

Основные результаты диссертации отражены в публикациях различного уровня, в том числе в журналах из перечня ВАК и изданиях, индексируемых в международных системах цитирования SCOPUS и WoS. Работа соответствует паспорту заявленной специальности, требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертационная работа и отзыв обсуждены 27.05.2021 на научном семинаре кафедры «Прикладной математики и компьютерного моделирования» с привлечением специалистов кафедры высшей математики и кафедры разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина». Одним из основных направлений научной деятельности кафедры «Прикладной математики и компьютерного моделирования» является математическое моделирование процессов фильтрационного переноса в нефтяных и газовых пластах. Отзыв одобрен в качестве отзыва ведущей организации, протокол № 3.

В работе семинара приняли участие 23 члена научного семинара, из которых 6 докторов наук, 9 кандидатов наук.

Результаты голосования: «за» - 23 человека, «против» - нет, «воздержавшихся» - нет.

Отзыв подготовил профессор кафедры прикладной математики и компьютерного моделирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», кандидат физико-математических наук Осетинский Николай Иосифович.

Заведующая кафедрой
«Прикладной математики и
компьютерного моделирования»
д.т.н., профессор

Р.Д. Каневская

Профессор кафедры
«Прикладной математики и
компьютерного моделирования»
к.ф.-м.н., доцент

Н.И. Осетинский

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина»

119991, Москва, Ленинский проспект, д. 65, к. 1.

Телефон: +7(499) 507-8888,

E-mail: com@gubkin.ru

Веб-сайт: <http://www.gubkin.ru>

