

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Маркова Павла Владимировича «Исследование и применение дискретных моделей фильтрации на различных масштабах пористой среды», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертационной работы

В диссертации П.В. Маркова рассматривается комплекс задач, относящихся к развитию дискретных моделей фильтрации в нефтегазовых пластах с учетом различия масштабов пористой среды. Попутно автор развивает методы теории симметрий дискретных систем уравнений для построения эффективных методов их построения и размножения их решений. Гидродинамическое моделирование движения флюидов в пласте является одним из обязательных шагов современной разработки месторождений нефти и газа. Важность моделирования обусловлена выбором наиболее оптимальной системы разработки, обеспечивающей максимальный коэффициент извлечения нефти, но при этом сталкивается с трудностями наполнения моделей эмпирическими данными, описывающими строение и состояние пласта. В этой связи актуальными являются исследования, направленные на построение моделей фильтрации на разных масштабах (от порового пространства до месторождения) и обеспечения связей между ними. Научная значимость связана с развитием новых методов решения динамических систем уравнений, задающих такую фильтрацию, а также способов уменьшения объемов вычислений для набора необходимой статистики для перехода между различными масштабами. Таким образом, задачи диссертационной работы П.В. Маркова, связанные с применением теории симметрий для построения и размножения решений дискретных уравнений, разработки численных моделей и программных комплексов для описания фильтрации на различных масштабах пористой среды являются актуальными.

Научная новизна, результаты работы, их научная значимость и практическая ценность

Содержание Главы 1 включает обзор современных моделей процессов фильтрации в нефтяном пласте на различных масштабах от микроскопического (поры и капилляры) до гигаскопического (группа месторождений) и связей между ними. Выделяются масштабы, рассматриваемые в диссертации и являющиеся наиболее востребованными на практике: микромасштаб (десятки микрон) и макромасштаб (обобщение закона Дарси для нефтегазовых пластов). Одним из подходов к описанию микромоделей являются дискретные модели пористой среды. Для работы с ними в Главе 1 обсуждаются методы теории симметрий для дискретных систем динамических уравнений. По результатам обзора моделей и методов их решения производится постановка задач исследования диссертации, связанных с компьютерным моделированием фильтрационных параметров пористых сред и их пересчета с микро- на макромасштабы, а также с построением эффективных численных методов и применением теории симметрий для снижения временных затрат на решение обратных задач разработки месторождений.

В Главе 2 кратко, но содержательно описываются основы группового анализа дифференциальных и дискретных динамических систем уравнений. Заметим, что в отличие от ставших классическими подходов для поиска и использования теории симметрий для дифференциальных уравнений, теория симметрий дискретных динамических систем является значительно менее проработанной и является предметом обсуждения в современной научной литературе. В этой главе получен ряд новых результатов, состоящих в групповой классификации разностных схем для двумерных и трехмерных дискретных динамических систем, а также разностных схем уравнений однофазной и двухфазной фильтрации.

В Главе 3 представлены методы размножения численных решений с использованием групп симметрий исследуемых уравнений. Нетривиальными моментами здесь являются изменение расчетной сетки, изменение начальных и граничных условий и сохранение точности решения под действием группового преобразования. Автор демонстрирует возможности применения инвариантных разностных схем для размножения численных решений уравнений фильтрации в различных формах. Метод с размножением решений является полезным в задачах, где требуется проведение многовариантных расчетов с целью решения обратных задач, ремасштабирования и проч.

Глава 4 посвящена описанию дискретных моделей фильтрации на масштабе пор. Эта тематика является частью обширной программы исследований по «цифровому керну», реализуемой в научном мире и нефтедобывающих компаниях по всему миру. В диссертации дан краткий обзор и классификация существующих подходов к поромасштабному моделированию. В качестве основного автор выбирает метод поровых сетей, состоящий в представлении порового пространства в виде идеализированной сети пор, соединенных каналами. Автор обсуждает существующие методы моделирования одно- и двухфазного течения в поровых сетях, а также демонстрирует возможность применения методов группового анализа для этих моделей.

В Главе 5 описывается процедура ремасштабирования дискретных моделей пористых сред от микро- до макромасштаба. Соискателем разработан программный комплекс *PoroScale*, реализующий процедуру ремасштабирования дискретных микромоделей с решением обратных задач и сопоставлением с измеряемыми данными. Непрерывные группы симметрий при этом применяются для ускорения расчетов решений динамических систем и генерации поровых сетей. Автором дан обзор существующих методов стохастической генерации моделей поровых сетей и предложен свой оригинальный подход генерации сетей без учета геометрической реализуемости. Этот подход обладает рядом преимуществ, связанных с учетом распределения физически важных величин и возможностью генерировать более широкий по сравнению с другими методами спектр моделей. Для поиска значений варьируемых параметров поровых сетей на основании решения обратной задачи применяется метод роя частиц. Предложен метод выделения макромасштабных регионов характерных дискретных моделей микромасштаба пористой среды, состоящий в выделении классов подобных микромоделей и выбора регионов применения макромоделей на основе полученных классов микромоделей. Предложенный алгоритм сопоставлен с известными литературными данными и результатами порометрии образцов керна с одного из месторождений Западной Сибири.

Таким образом, в работе получены новые результаты в области группового анализа дискретных динамических систем, разработан новый метод ремасштабирования дискретных

микромоделей на макромасштаб, включающий метод стохастической генерации моделей поровых сетей и решения обратных задач адаптации модели к измеряемым физическим параметрам зерна. Разработанный метод реализован в виде программного кода PoroScale.

Замечания к тексту диссертации

1. Названия разделов диссертации, начинающиеся со слова «новая» («новая групповая классификация», «новый метод размножения»,...) дезориентируют читателя, поскольку групповая классификация и размножение решений делаются классическим способом, но объект исследования является новым для применения данных методов. Кроме того, выражение типа «одномерная пористая среда» (стр. 50) некорректно, поскольку среда является трехмерной, но рассматриваемые процессы в ней описываются в одномерном приближении.
2. Для разностных схем решения дифференциальных уравнений обычно предъявляются требования устойчивости, консервативности, монотонности и проч., что важно с точки зрения качества и скорости получения численных решений. В диссертации не поясняется, какими из этих свойств обладают инвариантные разностные схемы, построенные на основании методов группового анализа, и можно ли гарантировать эти «хорошие» свойства при выборе конкретного вида инвариантных разностных схем.
3. Один из этапов проведения групповой классификации дифференциальных уравнений состоит в определении преобразований эквивалентности, действующих только на произвольный элемент, но сохраняющих структуру дифференциального уравнения. Описание таких преобразований позволило бы сократить ненужный произвол в выборе произвольных элементов при классификации уравнений в Главе 2. Было бы также интересно расширить понятие преобразований эквивалентности на дискретные динамические системы.
4. Из текста Главы 5 не всегда ясно, какие части алгоритма автор реализовал самостоятельно, а где воспользовался существующими программными средствами.

Указанные замечания носят редакторский характер или являются рекомендациями для дальнейших исследований и нисколько не умаляют значимости проделанной работы. Результаты работы подкреплены соответствующими численными расчетами или теоретическим обоснованием. Автореферат соответствует тексту диссертации, все основные результаты опубликованы надлежащим образом.

Заключение

Диссертация П.В. Маркова является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые математические модели и даны важные практические рекомендации для составления моделей фильтрации на разных масштабах и сопоставления моделей различного уровня. Разработанный программный комплекс PoroScale включает генератор и визуализатор моделей поровых сетей, алгоритм адаптации моделей поровых сетей к измеряемым характеристикам зерна, алгоритмы размножения численных решений уравнений фильтрации. В диссертации также имеются свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и акт внедрения

результатов работ на предприятии МикроМодел. Указанные в отзыве замечания не снижают общего научного уровня диссертации.

Теоретические результаты диссертации могут быть полезны для построения и размножения численных решений дискретных систем уравнений различной природы, а алгоритм ремасштабирования моделей фильтрации должен найти применение в научно-технических центрах нефтегазовых и сервисных компаний.

Таким образом, диссертация «Исследование и применение дискретных моделей фильтрации на различных масштабах пористой среды», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» соответствует требованиям ВАК, а ее автор Марков Павел Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв составил:

главный научный сотрудник
лаборатории цифровых и интеллектуальных систем
добычи углеводородов
ИГиЛ СО РАН,
д.ф.-м.н, профессор РАН,
специальность 01.01.02 – дифференциальные уравнения,
динамические системы и оптимальное управление
Сергей Валерьевич Головин

15.06.2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН)
просп. акад. Лаврентьева, д.15, г. Новосибирск, 630090
тел/ф. (383) 333-16-12, igil@hydro.nsc.ru

Подпись Головина Сергея Валерьевича заверяю: зав. канцелярией Иванова А.В.

