

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора - начальника Управления
научной политики и организации научных
исследований МГУ имени М.В. Ломоносова


«15» / сентября / 2016 г.


ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
факультета вычислительной математики и кибернетики
кафедры вычислительных методов
на диссертационную работу
Балашова Владислава Александровича

«Прямое численное моделирование течений жидкости в поровом пространстве пород-коллекторов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

В диссертационной работе рассмотрен ряд вопросов, связанных с прямым моделированием течений жидкости в поровых пространствах образцов горных пород. Особенностью используемых в исследовании математических моделей, является разработанный в 1980-х годах квазигидродинамический подход. Благодаря этому удается использовать логически простые разностные схемы, что является существенным преимуществом в рассматриваемой области.

Актуальность

Применение математических моделей и соответствующих вычислительных алгоритмов в нефтегазовой отрасли является насущной необходимостью. Математическое моделирование используется для разработки и обоснования плана разработки месторождения, определения оптимального метода воздействия на пласт с целью увеличения нефтеотдачи, ее оптимизации и контроля и др. На обоснованность результатов моделирования во многом влияет качество входных параметров, коими являются параметры пласта, и адекватная оценка степени их неопределенности, которые могут быть получены экспериментальными методами. Тем не менее, особенно для пластов со сложной структурой, результаты экспериментов могут отличаться невысокой точностью. Поэтому развитие тех или иных методик, призванных в известном смысле уменьшить их погрешность, а также улучшить оценку степени их неопределенности является актуальной задачей.

Одним из важных методов исследования являются лабораторные эксперименты на образцах керн, призванные определять абсолютную проницаемость, относительную фазовую проницаемость, пористость и другие параметры. Эти эксперименты связаны со значительными сложностями, и с развитием вычислительной техники все большую популярность стала набирать технология «цифровой керн», призванная дополнить лабораторный эксперимент. Основу указанной технологии составляет моделирование течения жидкости непосредственно в поровом пространстве пород-коллекторов и учет в известном смысле «первичных» физико-химических механизмов. При этом расчетная область строится на основе результатов микротомографии и последующей обработки полученных изображений. Таким образом, появляется возможность учитывать все физико-химические механизмы, влияющие на вытеснение флюида в масштабах месторождения, на микроуровне.

Прямое моделирование вытеснения жидкости в геометрии образцов горных пород с целью определения их макроскопических характеристик является весьма сложной задачей, как с математической, так и с вычислительной точки зрения и является частью одной из наиболее сложных и востребованных областей моделирования – моделирование многофазных сред в неоднородных областях. Не смотря на то, что настоящее время в данной области существует большое количество математических моделей, универсальные модели существуют только в общем виде и требуют каждый раз большого объема научной работы для их адаптации к конкретным задачам. При этом выбор методики такой редукции также является отдельным научным исследованием и определяется доступными экспериментальными данными, требуемой точностью моделирования, возможностью проведения расчетов за разумное время с приемлемой точностью. Именно к такому типу работ и принадлежит рассматриваемая диссертация. В качестве основного метода построения моделей выбран квазигидродинамический подход, позволивший автору с высокой степенью обоснованности решить поставленную задачу.

Содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа написана на 108 страницах. Список литературы включает 141 наименование.

Во введении обоснована тема работы и ее актуальность. Приведен краткий обзор литературы по теме диссертацию. Определены цели, сформулированы защищаемые положения.

Первая глава посвящена особенностям задач моделирования течений жидкости в поровом пространстве горных пород. Сформулированы требования, обеспечивающие эффективность используемого численного метода и его применимость на практике. В качестве такого метода предложена система квазигидродинамических (КГиД) уравнений. Приведена система, описывающая течение однофазной однокомпонентной вязкой сжимаемой теплопроводной жидкости и соответствующие определяющие соотношения.

Вторая глава посвящена описанию используемой геометрической модели, разностной схемы, и реализованного на ее основе параллельного программного комплекса для моделирования течения жидкости в поровом пространстве образцов горных пород.

В третьей главе приведены примеры моделирования слабосжимаемых вязких течений. Рассмотрены как классические задачи (течение жидкости в кубической каверне, в трубе квадратного сечения, двумерное обтекание цилиндра), так и задачи, специфичные для области исследования (течение жидкости в поровом пространстве модельных пористых сред: круглые трубы, наклонные эллиптические трубы). Полученные результаты соответствуют данными, опубликованными в литературе или полученными аналитически.

Также приведены результаты моделирования течений в поровом пространстве образцов реальных горных пород с помощью разработанного программного комплекса. Проведено сравнение с результатами, полученными с помощью пакета Palabos, основанного на методе решеточных уравнений Больцмана, являющегося весьма популярным в области моделирования течений в областях со сложной геометрией. Показано, что результаты хорошо согласуются между собой.

В четвертой главе приведен феноменологический вывод модели типа «диффузной» границы, описывающей многофазные многокомпонентные течения с учетом поверхностных эффектов на основе квазигидродинамического подхода. Вывод определяющих соотношений основан на процедуре Колмана-Нолла, так что результирующая модель является термодинамически согласованной, то есть выполняется второй закон термодинамики. Также разработана явная разностная схема для моделирования двумерного изотермического течения и приведены результаты тестовых расчетов: эволюция капли квадратной формы, слияние двух капель и самопроизвольный распад возмущенной однородной двухкомпонентной жидкости на две фазы. Результаты демонстрируют, что разработанная модель и разностный алгоритм качественно верно описывают достаточно тонкие процессы, в частности, процессы, связанные с поверхностным натяжением.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты, полученные в ходе ее выполнения.

Наиболее существенные результаты, полученные соискателем:

1. термодинамически согласованная математическая модель течения многофазной многокомпонентной жидкости с учетом поверхностных эффектов, разработанная на основе квазигидродинамического подхода;
2. разностный алгоритм для расчета двумерного двухфазного двухкомпонентного изотермического течения;
3. параллельный программный комплекс для моделирования однофазного однокомпонентного течения жидкости в поровом пространстве образцов горных пород. Показано, что предложенная технология может быть применена к рассматриваемому классу задач.

Новизна полученных результатов

В диссертации на основе квазигидродинамического подхода разработана новая математическая модель для моделирования многофазных течений с учетом поверхностных эффектов. Построен новый разностный алгоритм, с помощью которого продемонстрирована корректная работа построенной математической модели на качественном уровне. Применен квазигидродинамический подход для моделирования течений однофазной жидкости в поровом пространстве образцов горных пород, разработан и реализован соответствующий программный комплекс для проведения вычислительных экспериментов в рамках сформулированных моделей на параллельных вычислительных системах.

Практическая и научная ценность результатов

В работе реализован программный комплекс для расчета однофазных однокомпонентных течений в поровом пространстве образцов горных пород с целью определения их макроскопических характеристик на основе квазигидродинамической системы уравнений. Разработанный программный комплекс применяется для расчета течений в поровом пространстве горных пород, но, в сущности, может быть успешно

использован и для решения других задач, связанных с моделированием течений вязких сжимаемых теплопроводных жидкостей и имеет большой потенциал развития и применения.

Разработана квазигидродинамическая модель многофазного многокомпонентного течения, учитывающей поверхностные эффекты. Данная модель в дальнейшем позволит строить сравнительно простые разностные аппроксимации для расчета многофазных многокомпонентных течений, учитывающей поверхностные эффекты, в поровом пространстве образцов горных пород с целью определения таких их макроскопических проницаемость. Нужно отметить, что разработанная модель может быть применена и в других областях, например моделирование микротечений многофазных жидкостей в так называемых МЭМС (Микро Электро Механических Системах), в которых важно разрешение и описание динамики межфазных границ.

Рассмотрены примеры расчета двухфазных двухкомпонентных двумерных течений. Они носят модельный характер, но демонстрируют, что выбранный подход, разработанные модели и разностный алгоритм качественно верно описывают поверхностные эффекты и может быть обобщен и на другие задачи.

Результаты диссертации могут быть использованы в теоретических и прикладных исследованиях, проводимых в МГУ имени М.В.Ломоносова, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, ИММ УрО РАН, МАИ, МФТИ и других организациях и учреждениях, занимающихся исследованием и разработкой алгоритмов решения подобных задач.

Достоверность полученных результатов обеспечена строгостью используемого математического аппарата, совпадением результатов вычислительных экспериментов с данными, опубликованными в литературе, аналитическими решениями или результатами, полученными с помощью других методов.

Замечания по работе

В тексте содержится большое количество ссылок на работы, результаты которых использованы в диссертации, и эти ссылки зачастую (стр.12, 13,22,48 и др.) приводятся автором для обоснования тех или иных выводов и соотношений. Значительное количество и качество использованных по существу дела источников свидетельствует в пользу автора и говорит о его высокой квалификации и владением материалами по теме. Однако, часто при этом отсутствуют комментарии и хотя бы конспективное изложение используемого материала, что затрудняет чтение текста.

Значительная часть работы посвящена реализации параллельного программного комплекса. Хотелось бы, чтобы автор большее внимание уделил исследованию производительности программы, масштабированию и т.п., что важно при оценке возможных дальнейших практических применений.

Одним из центральных мест работы является использование КГид приближения, которое характеризуется наличием специфического регуляризирующего элемента с параметром. Этому посвящено два абзаца (стр.12), а выбору параметра – несколько предложений в разных частях текста, хотя наличие этого слагаемого играет важнейшую роль в данной работе, особенно для построения разностной схемы. Хотелось бы видеть более полный анализ преимуществ использованного подхода.

Общая оценка работы

Приведенные замечания не снижают ценности проделанной работы. В работе рассмотрены актуальные задачи. Постановка и методы решения задач ясны и обоснованы. В данном исследовании присутствуют все компоненты математического моделирования – построение моделей, разработка алгоритмов, их реализация и проведение вычислительного эксперимента. При выполнении работ по всем упомянутым компонентам автор продемонстрировал высокую квалификацию, успешно выполнив их на самом современном (в том числе и высоком математическом) уровне. Результаты обладают научной новизной и практической ценностью. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Балашова В.А. является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842), а ее автор Балашов Владислав Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором кафедры вычислительных методов, Мухиным Сергеем Ивановичем.

Работа обсуждена на научном семинаре кафедры вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М. В. Ломоносова. Отзыв утвержден на научном семинаре кафедры вычислительных методов 14.09.2016 г.

Профессор кафедры
вычислительных методов факультета ВМК МГУ имени
М.В.Ломоносова, д.ф-м.н.



— Мухин С. И.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», факультет вычислительной математики и кибернетики
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 52, факультет ВМК
Тел. 8 (495) 939-30-10
e-mail: cmc@cs.msu.su, <http://www.cs.msu.su/>

