

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук Колдобы Александра Васильевича
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 рамках разработки и обоснования плана освоения месторождения одну из ключевых ролей играют постоянно-действующие геолого-технологические модели нефтегазовых месторождений. Успешность применения математического моделирования в рамках указанных моделей во многом зависит от качества входных данных и адекватной оценки их неопределенности. Одним из основных методов определения этих параметров являются лабораторные эксперименты, проводимые на образцах горных пород, поднятых из ствола скважины при бурении. Однако, хорошо известны недостатки такого подхода: сложность или даже невозможность получения качественного кернового материала в достаточных количествах, высокая стоимость применения ряда методик лабораторных исследований, невозможность проведения массовых экспериментов на одном образце, невозможность воссоздания полного спектра пластовых условий, невозможность проведения параметрических исследований.

Описанных недостатков лишена сравнительно недавно появившаяся технология «цифровой керн». Ее особенностью является построение геометрической модели порового пространства на основе данных микротомографии и использование полученной геометрии в численных расчетах течения. Таким образом, в указанной технологии используется «прямое» (по сравнению с макроскопическими моделями фильтрации) математическое моделирование процессов, происходящих в пласте. Среди преимуществ указанной технологии стоит отметить следующие: сокращение количества лабораторных экспериментов и сокращение сроков исследования, возможность анализа практически любых образцов породы, возможность воссоздания в вычислительном эксперименте широкого спектра пластовых условий, возможность проведения полноценных параметрических исследований.

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена развитию и применению методов гидродинамического моделирования течения жидкости в поровом пространстве пород-коллекторов. Наиболее сложной и трудоемкой частью представленной диссертации является разработанная математическая модель течения многофазной многокомпонентной жидкости, учитывающей поверхностные эффекты на межфазных границах. В настоящее время можно выделить ряд математических моделей и методов расчета таких задач, среди которых выделим модели типа «диффузной границы». Модели такого типа являются наиболее физически обоснованными, но и вместе с тем самыми

сложными. Поэтому разработка математической модели многокомпонентных течений флюидов в геометрически сложном поровом пространстве пород-коллекторов, соответствующих численных методов и комплексов программ для численного интегрирования соответствующих уравнений является актуальной задачей.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель: разработка математических моделей, вычислительных алгоритмов и комплексов программ для анализа течения жидкости в поровом пространстве. Там же сформулированы основные задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели. Также проведен обзор существующих методов и соответствующей литературы. Приведено обоснование направления исследования.

В первой главе описаны особенности рассматриваемого класса задач, и в качестве метода, удовлетворяющего указанным особенностям, предложен метод основанный на квазигидродинамической системе (КГид) уравнений. Приводится система КГид уравнений для течения однофазной однокомпонентной вязкой теплопроводной сжимаемой жидкости.

Во второй главе описана используемая геометрическая модель, разностная схема, построенная на основе КГид уравнений движения однофазной однокомпонентной сжимаемой вязкой теплопроводной жидкости. Пространственные производные аппроксимируются центральными разностями. Схема является явной по времени. Устойчивость разностной схемы обеспечивается дополнительными физически обоснованными регуляризаторами. Описан реализованный параллельный программный комплекс.

В третьей главе рассмотрено моделирование однофазных однокомпонентных течений слабосжимаемых жидкостей в различных постановках: обтекание цилиндра квадратного сечения, течение в трубе квадратного сечения, кубической каверне и в пористых средах. Рассматриваются течения как в модельных пористых средах, для которых коэффициент проницаемости можно определить аналитически, так и в реальных. Все полученные результаты согласуются с аналитическими данными, либо с данными из литературы, либо с результатами, полученными с помощью других методов.

В четвертой главе приведен вывод КГид системы уравнений для случая течений многофазной многокомпонентной жидкости с учетом поверхностных эффектов. Вывод основан на двух ключевых идеях: с одной стороны вводятся так называемые микросилы и микронапряжения, отвечающие за эволюцию микроструктуры среды, а с другой используется процедура Колмана-Нолла. Используемый автором подход относится к моделям типа «диффузной границы». В рамках этого подхода предполагается, что фазы разделены слоем конечной ширины, в пределах которого действуют силы межфазного взаимодействия, определяющие динамику контактной границы. При выводе предполагается, что флюид состоит из нескольких компонентов, причем в произвольном физически бесконечно малом объеме могут присутствовать все

из них. Далее стандартным образом выписываются законы сохранения. Одной из особенностей, характерных для большинства моделей типа «диффузной границы» является специальный вид свободной энергии Гельмгольца: в нее добавляются слагаемые, отвечающие за «нелокальность» (зависимость от градиентов концентраций и плотности) и за разделение компонентов. В конце главы приведены результаты расчетов нескольких модельных двумерных изотермических течений: эволюция капли «квадратной» формы, слияние двух капель и «спинодальный» распад. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что полученная система уравнений по крайней мере качественно корректно описывает гидродинамические эффекты, обусловленные поверхностным натяжением.

В *Заключении* сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна рассматриваемой работы обусловлена в основном обобщением системы КГид уравнений на случай течений многокомпонентных многофазных флюидов с учетом поверхностных эффектов. Как следствие, новой является разностная схема, используемая для расчетов изотермических течений двухфазного двухкомпонентного флюида. Такой подход имеет хорошие перспективы для развития, поскольку он основан на термодинамически согласованном методе построения моделей механики сплошных сред и позволяет использовать логически простые разностные схемы.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и защищаемых положений обеспечивается корректностью математического аппарата, аккуратным тестированием программного комплекса на примере решения тестовых задач и сравнением полученных результатов с опубликованными данными, аналитическими решениями или результатами, полученными с помощью других методов.

Практическая и научная ценность работы заключается в том, что она содержит как теоретические разработки моделей сплошной среды, так и существенные практические результаты.

Разработанная автором квазигидродинамическая модель течения многофазной многокомпонентной жидкости с учетом поверхностных эффектов может позволить осуществлять прямое моделирование течений многофазных флюидов в поровом пространстве с разрешением межфазных границ. Предложенная модель может иметь плодотворное развитие как в рамках изучения класса задач, связанного с определением макроскопических свойств образцов горных пород (например, абсолютных и относительных проницаемостей), так и в рамках других задач, связанных с учетом межфазных взаимодействий на мезоуровне.

Разработанные автором алгоритмы реализованы в виде пакета прикладных программ «3dqh» для численного решения задач гидродинамики в поровом пространстве образцов пород-коллекторов с целью определения их коэффициентов проницаемости. Работоспособность созданного программного комплекса успешно продемонстрирована на примерах решения ряда задач.

Результаты расчетов нескольких двухмерных двухфазных изотермических задач демонстрируют, что полученная система уравнений качественно верно описывает поверхностные явления.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное научное исследование.

Недостатки работы

1. К недостаткам работы можно отнести недостаток внимания к постановке граничных условий на твердой поверхности в многофазном случае. Это представляется важным в рамках описанной прикладной задачи моделирования течения многофазного флюида в поровом пространстве пород-коллекторов.
2. В работе мало внимания уделено исследованию характеристик производительности и масштабируемости. Это представляется важным в связи с большими размерностями решаемых задач.
3. Поскольку для однофазного случая разработанный автором программный комплекс позволяет моделировать в том числе и неизотермические течения, то стоило бы провести несколько расчетов существенно неизотермических течений.

Указанные недостатки не являются препятствием для заключения о том, что диссертация Балашова Владислава Александровича заслуживает положительной оценки. Работа полностью соответствует специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, удовлетворяет общим требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно Положению о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013г. №842. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Считаю, что Балашов Владислав Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук, с.н.с,
заведующий Лабораторией флюидодинамики и
сейсмоакустики МФТИ

Колдоба А. В.

12.09.2016

141700, Московская область,
г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9., +7 (495) 408-45-54, info@mipt.ru

Подпись заведующего Лабораторией флюидодинамики и сейсмоакустики
МФТИ Колдобы Александра Васильевича удостоверяю.

Ученый секретарь МФТИ, к.ф.-м.н.



Скалько Ю. И.