

О Т З Ы В

официального оппонента

на диссертацию Гасиловой Ирины Владимировны

“Моделирование диссипативных процессов в пористых средах с газогидратными отложениями”,

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – “Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ”.

Актуальность исследования. Диссертация И.В. Гасиловой посвящена решению проблемы создания эффективных численных методик комплексного моделирования течений газа и жидкости в коллекторах углеводородов с включениями твердой фазы – газогидратов. Актуальность этих работ вызвана тем, что, в мире растет интерес к нетрадиционным источникам углеводородного сырья, под которым подразумеваются его трудноизвлекаемые типы (битумы, нефтяные пески, сланцевая нефть, сланцевый газ и т.п.). Активно осваиваются недоступные ранее месторождения на морском шельфе, в арктических условиях и т.д. Все это приводит к необходимости крупномасштабной смены технологий добычи. Месторождения газа с включениями газогидратов являются такими, успешная эксплуатация которых невозможна без новых технологических решений. Созданию таких решений должны предшествовать предпроектные исследования на основе численного моделирования. Отметим, что добыча углеводородов в системе, где могут происходить быстрые фазовые переходы «взрывного типа», представляет собой сложную техническую задачу, при решении которой надо учитывать угрозу техногенных катастроф. Кроме того, известно много типов месторождений, данные их натуральных исследований нуждаются в систематизации. Такая систематизация приводит к необходимости изучения нелинейных многомерных начально-краевых задач математической физики. Поэтому математическое моделирование здесь выходит на первый план как основной инструмент теоретического анализа. Под комплексным моделированием в таких задачах подразумевается изучение взаимосвязанных процессов тепло- и массопереноса с учетом фазовых переходов в среде с анизотропными свойствами, которые могут изменяться на разных пространственных масштабах. Соответственно, расчетные области в данном случае могут состоять из нескольких смежных подобластей или накладывать некоторые иные ограничения на размер и положение элементов расчетной сетки. Фактически для таких областей надо говорить об адаптации сетки к геометрии области (в отличие от адаптации к решению). Известные прикладные (коммерческие) коды не всегда могут справиться с задачами из данной предметной области, что влечет необходимость создания собственных исследовательских комплексов и прикладных программ. Необходимо также отметить, что развитие

техники для высокопроизводительных вычислений также стимулирует развитие данного направления. Это говорит об актуальности темы диссертации И.В. Гасиловой.

Общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы, отмечается актуальность выбранной темы исследования, формулируются цели и задачи работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведены основные сведения о составе и свойствах газогидратов и содержащих их сред, проводится обзор методов извлечения газа из соединений, отмечаются достоинства и недостатки каждого из методов применительно к различным типам месторождений.

Во второй главе рассматриваются подходы к моделированию задач фильтрации флюидов в пористых средах, обосновывается выбор развития математической модели основанной на балансовых соотношениях в предположении о равновесном характере процесса диссоциации газовых гидратов. Приводится система уравнения, которая описывает фильтрационные процессы в пористой среде с жестким скелетом, насыщенной газовыми гидратами, как при распаде, так и при образовании гидратов. Далее система уравнений расщепляется по физическим процессам на два блока с целью построения эффективных численных методик ее решения. Автором рассматривается математическая модель, состоящая из двух блоков – сатурационного и диссипативного. Проводится исследования свойств каждого блока. Показано, что уравнения сатурационного блока имеют, в основном, к гиперболический тип, а уравнения диссипативного блока, из которых выводится уравнение пьезопроводности, – параболический тип.

В третьей главе описаны развитые автором разностные схемы на основе метода опорных операторов применительно к геофизическим задачам с разрывными коэффициентами и сложной разномасштабной структурой пласта. Аппроксимационные свойства построенных разностных схем исследуются на примере решения ряда тестовых задач.

В четвертой главе описана программная реализация предложенной автором математической модели и вычислительных алгоритмов в виде расширяемого современного кода для многопроцессорной вычислительной техники.

В пятой главе приведены результаты численного моделирования некоторых задач газогидратной тематики на примере Мессояхского газогидратного месторождения. Численные расчеты для сатурационного блока подтверждают теоретические выкладки, сделанные автором во второй главе работы, о разнонаправленности характеристик гиперболической системы уравнений и осуществлении процесса устойчивого счета. Трехмерные расчеты для диссипативного блока, проведенные с использованием

адаптивных тетраэдральных сеток, позволяют наблюдать эффект от разложения гидратов в центральной зоне разработки пласта.

В заключении диссертационной работы автор формулирует основные результаты проделанной работы.

Научная новизна. Следует отметить, что использованная для получения двухблочной математической модели технология расщепления по физическим процессам не нова, она применялась для двухфазных систем (вода-газ). Однако применительно к уравнениям, содержащим газогидратную фазу, данная процедура применена впервые и успешно, что говорит об адекватном выборе направления исследования (направления работы). Это следует отметить как несомненное достоинство диссертации. В результате удалось построить устойчивый численный алгоритм, позволяющий проводить расчеты с достаточно крупными шагами по времени. Отдельный интерес представляет изучение построенных операторно-согласованных разностных схем, построенных для трехмерных сеток нерегулярной структуры, обладающих рядом интересных свойств. Эти результаты являются новыми.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и защищаемых положений обеспечивается корректностью математического аппарата, аккуратным тестированием программного комплекса на примере решения тестовых задач, моделированием физических процессов реального газогидратного месторождения с помощью разработанных программных средств.

Предложены варианты алгоритмов для построения сеток в сложных областях, а также алгоритмы оптимизации сеток. Не обойден вниманием ряд вопросов прикладного характера, в частности проблемы визуализации трехмерных результатов, оценки качества элементов, проблемы хранения сеток в памяти и на жестком диске.

Практическая ценность работы. Разработанные автором алгоритмы дискретизации и оптимизации были реализованы в виде версии пакета прикладных программ "MARPLE3D", разработанного в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН для численного решения задач физической гидро-газодинамики на высокопроизводительных вычислительных системах.

Работоспособность созданного комплекса программ успешно продемонстрирована на примерах решения ряда задач, в частности, задач формирования депрессионных воронок для отдельной скважины и для кустов скважин. Постановки таких задач модельные, тем не менее, результаты решения могут быть использованы в практических исследованиях. Изучение диссипативных процессов в средах с газогидратными отложениями представляет самостоятельное направление исследований. Решение модельных задач о динамике флюидов в условиях тепло-массообмена с гидратной компонентой показало, что комплекс программ, созданный

И. В. Гасиловой, позволяет получать результаты при умеренных затратах машинного времени.

Таким образом, работа включает в себя как теоретические исследования, так и существенные практические результаты. Отметим прежде всего создание проблемно-ориентированного комплекса прикладных программ для расчета сложных процессов с фазовыми переходами. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, содержит значительный объем примеров и иллюстративного материала и представляет собой законченное научное исследование.

Недостатки диссертации.

1. В работе имеется подробный обзор по проблеме извлечения газа из соединений, отмечаются достоинства и недостатки методов применительно к различным типам месторождений. Но в диссертации не хватает обзора по численным методам. Применяемым для решения данного класса задач. Отсутствует обзорная часть про развитие методов операторной аппроксимации, что тем более странно, так как эти методы развивались в ИПМ им. М.В. Келдыша. Отсутствие такого обзора затрудняет чтение диссертации и оценку вклада автора в развитие методов операторной аппроксимации.

2. Для ряда утверждений диссертации отсутствует необходимый доказательный материал. Так, на стр. 84 содержится утверждение, что реальный порядок аппроксимации метода не меньше 1.7. В тексте диссертации отсутствуют таблицы или графики, подтверждающие этот вывод.

Не приведены графики реального ускорения на различном числе исполнителей при проведении параллельных расчетов. Это затрудняет оценку эффективности распараллеливания и масштабируемости алгоритма.

3. В диссертации не приведены никакие априорные оценки эффективности распараллеливания. Было бы интересно получить такие оценки и сравнить с реальной эффективностью параллельной реализации.

4. При решении тестовых задач о тепловой волне приведенные в качестве иллюстрации сетки имеют ячейки примерно одинаковых размеров. Расчет задач о скважине и кусте скважин проводится на сетках, для которых масштабы ячеек различаются на порядки. Было бы целесообразно провести тестовые расчеты и на сетках с разным масштабом ячеек, сделать заключение, насколько наличие ячеек разного масштаба скажется на качестве решения.

5. В диссертации присутствуют некоторые научные жаргонизмы (например, «вектор смотрит в базис»), нежелательные в тексте диссертационной работы.

Имеются опечатки. Так, в левой части формулы без номера на стр. 54 присутствует лишний знак оператора градиента.

Указанные недостатки не являются препятствием для заключения о том, что диссертация Гасиловой И.В. заслуживает положительной оценки. Работа полностью соответствует специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, удовлетворяет общим требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Считаю, что Гасилова Ирина Владимировна заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Оппонент

Доктор физико-математических наук.
Профессор кафедры информатики и
вычислительной математики МФТИ
141700, Московская область,
г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.
тел. +7 (495) 408-45-54
e-mail info@mipt.ru



10.05.16

Алексей Иванович Лобанов

Подпись профессора Лобанова А.И. удостоверяю

Ученый секретарь МФТИ
к. ф.-м. н., доцент



Юрий Иванович Скалько