

## Отзыв официального оппонента

**д.ф.-м.н. Каракина Андрея Владимировича**

**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.**

*Пreamбула.* В диссертации И.В. Гасиловой рассматривается трехмерная модель, описывающая многокомпонентное газожидкостное течение в пористой среде с учетом диссоциации газовых гидратов. Содержанием диссертации является разработка разностных аппроксимаций уравнений математической модели, численных алгоритмов и программного обеспечения для моделирования эволюции газогидратных залежей. Указанная задача была выполнена ею на основе разбиения исходной системы уравнений на два блока. Был выделен блок гиперболических уравнений относительно водонасыщенности и растепленности при условии фиксированных скоростей фильтрации, а также блок, содержащий уравнение пьезопроводности для определения давления в пласте с газогидратными включениями. Расщепление проводилось по производным и не включало в себя сами переменные величины. Алгоритм решения исходной задачи на основе такого расщепления по физическим процессам был изучен как теоретически, так и с помощью численных экспериментов. В итоге исходная система уравнений была редуцирована к двум подсистемам – гиперболической и параболической. В параболической подсистеме решение уравнения пьезопроводности связано с обращением симметричной положительно определенной матрицы меньшей размерности. В ней удалось построить алгоритм, позволяющий проводить расчеты устойчиво и с достаточно крупным шагом по времени.

Актуальность избранной темы. Работы по исследованию проблем разработки коллекторов с газогидратными включениями, выполняемые методами математического моделирования, инициированы рядом крупных российских и зарубежных специалистов области нефтегазодобычи и освоения газогидратных запасов – Ю.Ф. Макогоном, А.В. Щebetовым, К.С. Басниевым, М. Курихарой, И. Масудой, Дж. Холдером, Р. Бишной и другими. Использование методологии вычислительного эксперимента началось примерно с 1970-х годов, и расширилось в дальнейшем по мере развития вычислительной техники. В настоящее время активно внедряется моделирование на высокопроизводительных вычислительных системах. Поэтому тема диссертации И.В. Гасиловой вполне актуальна.

*Структура и содержание работы.* Диссертация Гасиловой И.В. состоит из пяти глав. Во введении к диссертации показана актуальность работы, сформулированы основные положения и научная новизна. Первая глава носит ознакомительный характер с природой газовых гидратов и способами их разложения на составляющие для извлечения природного газа.

Во второй главе представлена модель флюидодинамики в пористых средах, содержащих газовые гидраты. Обоснован выбор модели, основанный на балансовых соотношениях в предположении о равновесном характере процесса диссоциации газовых гидратов, выделены функциональные блоки, отвечающие соответствующим физическим процессам. К ним относятся уравнения переноса сатурационных возмущений (имеются в виду такие параметры как пористость, насыщенность и растепленность) и расчет термодинамических параметров системы. Произведен теоретический анализ указанных уравнений.

Третья глава посвящена развитию разностных схем на основе метода опорных операторов, применительно к задачам фильтрации в пластах сложной структуры. Строится семейство схем для трехмерных неструктурированных сеток, на модельных задачах исследуются свойства аппроксимации. Стоит отметить, что задачи такого рода требуют больших вычислительных

ресурсов. Проводится также исследование разработанных алгоритмов в условиях сильного изменения масштабов и показана их пригодность для проведения расчетов на суперкомпьютерах.

В четвертой главе описывается разработанное программное обеспечение для проведения вычислительных экспериментов на многопроцессорных вычислительных системах. Пятая глава содержит серию расчетов типичных для данной области задач, в которых моделируются различные конфигурации добывающих скважин. В заключении диссертации сформулированы основные результаты, полученные автором.

**Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.** В основе диссертационной работы лежат разработки разностных схем, свойства которых достаточно изучены. Апробация разработанного программного обеспечения произведена в серии вычислительных экспериментов. Результаты представлены в рецензируемых журналах, а также в докладах на международных конференциях. В диссертации присутствуют необходимые ссылки на работы по данной теме.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена теоретическими оценками, результатами представленных в третьей и пятой главах численных экспериментов, а также оценками эффективности реализованного программного комплекса в сравнении с результатами, опубликованными в научной литературе. Результаты, представленные в данной диссертации, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в реферируемых научных журналах, включая издания, рекомендованные ВАК РФ. Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.

Применительно к изучаемому классу задач для реализации модели было построено семейство разностных схем на основе метода опорных операторов. Уравнения параболического типа аппроксимируются на трехмерных неструктурированных сетках, адаптируемых к особенностям области (депресссионных воронок кустов скважин). Предложенные численные схемы и математическая модель реализованы в виде робастных алгоритмов и программного обеспечения для высокопроизводительных вычислительных систем.

С помощью разработанного программного обеспечения в вычислительных экспериментах были проведены исследование и верификация реализованной численной методики на модельных задачах, а также моделирование ряда актуальных для газогидратной тематики задач. Исследованы модельные задачи флюидодинамики в газогидратных коллекторах при наличии скважин. При этом использованы опытные данные (пористость, проницаемость и т.д.) соответствующие физическим характеристикам Мессояхского газогидратного месторождения (Западная Сибирь).

**Соответствие содержания диссертации специальности 05.13.18.** Содержание и результаты работы соответствуют паспорту специальности 05.13.18, а именно следующим областям исследований:

1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.
2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.
3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
4. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования

**Замечания.** К работе имеется ряд замечаний. В работе не сформулированы защищаемые положения. Вместо них говорится о научной новизне и достоверности результатов. Защищаемые положения должны отражать общую идею работы и включать в себя новизну, а также достоверность результатов. В качестве цели работы утверждается "развитие математической модели". На самом деле, автор берет уже известную готовую модель типа модели Мессояхского газогидратного месторождения и развивает лишь отдельные ее аспекты – алгоритмы и программное обеспечение – необходимые для численной реализации модели.

Новизна работы состоит в том, что исходные уравнения гидратно-газо-водяной модели

разделяются на два блока, независимых по производным, хотя зависимость по переменным сохраняется. Такое неполное расщепление на двухблочную модель приводит в вычислительных процедурах к матрицам меньших размеров. Эта процедура приводит к устойчивым алгоритмам и существенно сокращает объем вычислений. Раз уж акцент сделан на программное обеспечение, то представляют интерес выявить зависимость эффективности распараллеливания алгоритмов от вида ячеек: тетраэдры, призмы, кубы и т.д. Тем не менее, то, что автор сделал, уже вполне достаточно для кандидатской диссертации. Несмотря на перечисленные выше замечания, представленная работа заслуживает высокой положительной оценки. Замечания не умаляют научную ценность и практическую значимость работы.

Содержание диссертации удовлетворяет требованиям Положения ВАК, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, включая пункт 9 Положения Оно является научно-квалификационной работой, в которой предложена новая методология суперкомпьютерного моделирования сложных естественных систем. Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание. Диссертация «Моделирование диссипативных процессов в пористых средах с газогидратными отложениями» является самостоятельной завершённой научно-исследовательской работой и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Автор диссертации, Гасилова Ирина Владимировна, заслуживает присвоения ей учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейной геодинимики  
Института проблем нефти и газа  
Российской Академии Наук

А.В. Каракин



Москва, 119333, ул. Губкина, дом 3,  
E-mail: avkarakin@yandex.ru  
+7 (499) 135 7371

*Подпись А.В. Каракина*  
*завершено*  
*старший научный сотрудник*  
*И.Ю. Новиков* 06.05.2016.  
*Тел.: 8 (499) 135 7371-63*

