

## **Отзыв официального оппонента**

к. ф.-м. н. Ильи Витальевича Семенова

на диссертационную работу Рагимли Парвин Ильгар кызы  
«Математическое моделирование связанных процессов фильтрации в талой  
зоне и пьезопроводной среде с газогидратными включениями»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Актуальность исследования.** Диссертационная работа П.И. Рагимли посвящена совместному решению дискретных задач термодинамически равновесной двухкомпонентной трехфазной флюидодинамики с твердофазными газогидратными включениями и двухфазных процессов в талой зоне с отсутствием газогидратов, для которой производится расщепление по физическим процессам.

Большой теоретический и практический интерес к исследованию газогидратов в пористых средах в настоящее время вызван тем, что многие технологические процессы, осуществляемые в газовой, нефтяной и химической промышленности, сопровождаются образованием газовых гидратов. Также встречаются отложения гидратов природных газов в пористых пластах. Значительная часть теоретических и экспериментальных исследований газовых гидратов направлена на разработку эффективных способов предупреждения их образования при добыче, транспортировке и переработке газов. Поэтому данное направление, несомненно, является актуальным.

Целью исследования является разработка и реализация численных методов для моделирования фильтрационных процессов флюидов как в талой зоне, так и в среде с газогидратными включениями в соответствии с предлагаемым алгоритмом расщепления равновесной модели по физическим процессам.

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

Во введении рассматривалась актуальность выбранной темы исследования, показана практическая значимость полученных результатов, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и основные положения.

Первая глава работы носит обзорный характер – автор последовательно описывает существующие подходы к газогидратной тематике и анализирует их недостатки. Приводятся основные сведения и справочные данные о газовых гидратах которые используются при решении поставленных задач.

Вторая глава посвящена физико-математическому моделированию фильтрационных процессов флюидов в пористых средах при наличии газовых гидратов. Рассматривается исходная система уравнений, проводится ее расщепление на функциональные блоки, с целью дальнейшего применения эффективных алгоритмов решения этих уравнений.

В третьей главе приводится разностная схема для решения полной задачи математической модели фильтрации флюидов в пористых средах с газогидратными включениями, которая расщеплена на два функциональных блока. Построено семейство дискретных алгоритмов со свободно-объемной аппроксимацией уравнения пьезопроводности и блока переноса насыщенностей флюидов, расщепленных по физическим процессам. Полученная модель является полностью консервативной. Для реализации такой разностной схемы автор ввел специальную свободно-объемную нелинейную аппроксимацию сеточных функций по времени, которая зависит от доли объема в порах, занятом флюидами.

В четвертой главе описываются алгоритмы и структура прикладного программного комплекса, предназначенного для моделирования течений в пористой среде, позволяющего решать уравнения флюидодинамики в талой зоне и пьезопроводной среде с учетом фазовых переходов.

В пятой главе приводятся результаты численного моделирования нескольких модельных задач с помощью разработанных алгоритмов и реализованных программных средств, рассмотрено решение трансфазной задачи с использованием метода двойной каркасности.

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

**Новизна** полученных результатов и их научная ценность заключается в том, что разработан численный метод решения трансфазных задач в рамках многофазной модели фильтрации с учетом диссоциации газовых гидратов. Для численного моделирования трансфазных задач разработан новый класс операторно-согласованных разностных схем и представлены результаты совместного трансфазного расчета с динамически изменяющимися во времени пространственными локализациями различного числа фаз.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций и заключений, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием современных методов математического моделирования и вычислительных алгоритмов. Достоверность полученных результатов подтверждается апробацией на международных научных конференциях, в работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях.

Выполненные разработки создают основу для реализации дальнейших проектов создания цифровых технологий, востребованных в нефтегазовой отрасли.

**Основные публикации.** Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли достаточную апробацию на 5 научно-технических конференциях, в том числе с международным участием, и опубликованы в 9 научных трудах соискателя, 3 из которых включены в международные базы данных и системы цитирования Scopus, Web of Science.

Из недостатков работы можно отметить следующие.

1. Обзор в первой главе некоторых устаревших подходов кажется излишним. Их стоило бы вынести во введение в виде исторической справки или совсем опустить. В обзоре упоминается значительное количество программных комплексов для моделирования гидратной флюидодинамики, однако особенности математических моделей и вычислительных методов, которые в них использованы, отражены недостаточно подробно.
2. Использование для написания программного комплекса «HYDRAT1D» в качестве программной платформы Node.js ограничивает возможности его расширения для решения многомерных задач гидратной флюидодинамики. В работе не представлены данные о возможности параллельной реализации расчетного алгоритма и использовании для проведения вычислительных экспериментов многопроцессорных ЭВМ.
3. При решении модельных задач использована равномерная сетка и небольшой физический размер расчетной области. Расчет процессов флюидодинамики скважин обычно проводится на сильно неравномерных сетках и для значительно больших размеров областей расчета. В связи с этим было бы полезно представить результаты тестирования работы вычислительного алгоритма для постановок более близких к реальным, и оценить качество его работы на неравномерных сетках и больших временах интегрирования.
4. В списке модельных задач целесообразно было бы привести постановку и решение задачи об образовании гидратов.
5. При оформлении графиков результатов расчетов в главе 5 следовало бы использовать несколько разных видов линий, тк очень трудно определить соответствие между графиками и моментами времени.
6. Объяснение пиков температуры в талой зоне на рисунке 5.16 требует дополнительного анализа, тк в талую зону поступают газы с пониженной температурой.
7. В списке использованных источников следовало бы отделить собственно публикации (статьи, доклады, книги) от инструкций, описаний и других источников в Интернет, публикациями не являющихся.
8. В диссертации присутствуют опечатки и стилистические погрешности.

Тем не менее, указанные недостатки не снижают ценности полученных результатов.

### **Заключение**

Результатом диссертационной работы П.И. Рагимли является решение важной задачи актуального направления в информационных технологиях.

Приведенные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие большое практическое и научное значение.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Рагимли Парвин Ильгар кызы заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник  
Института автоматизации проектирования  
Российской академии наук,  
кандидат физико-математических наук

И.В. Семенов

22.11.2018

Шифр специальности, по которой защищена кандидатская диссертация Семенова И.В. – 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Москва, 123056, 2-я Брестская ул., 19/18,  
Института автоматизации проектирования  
Российской академии наук  
Телефон: +7 (499) 250-82-86  
e-mail: semenov@icad.org.ru

Подпись Семенова И.В. удостоверяю

Ученый секретарь  
Института автоматизации проектирования  
Российской академии наук, к.т.н.



Н.Г. Сызранова