

Результаты публичной защиты

Дата защиты: 12 апреля 2018 г.

Соискатель: **Рагимли Парвин Ильгар кызы.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Математическое моделирование связанных процессов фильтрации в талой зоне и в пьезопроводной среде с газогидратными включениями».

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании председательствует – Председатель диссертационного совета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор Б.Н. ЧЕТВЕРУШКИН.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 25 членов диссертационного совета присутствовали 18, из них 7 докторов по профилю рассматриваемой диссертации:

1.	ЧЕТВЕРУШКИН Б.Н.	д.ф.-м.н.	05.13.18
2.	КАЛИТКИН Н.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
3.	КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
4.	АНДРЕЕВ В.Б.	д.ф.-м.н.	01.01.07
5.	ГАСИЛОВ В.А.	д.ф.-м.н.	01.02.05
6.	ДОЛГОЛЕВА Г.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
7.	ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.02.05
8.	ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
9.	КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
10.	КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
11.	КОЛЕСНИЧЕНКО А.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
12.	КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
13.	ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
14.	МИЛЮКОВА О.Ю.	д.ф.-м.н.	01.01.07
15.	МИХАЙЛОВ А.П.	д.ф.-м.н.	05.13.18
16.	ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
17.	ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
18.	ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 13.12.2018 г. № 23

О присуждении **Рагимли Парвин Ильгар кызы**, гражданке Азербайджана, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Математическое моделирование связанных процессов фильтрации в талой зоне и в пьезопроводной среде с газогидратными включениями» по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 11 октября 2018 г. (протокол заседания № 23/пз) диссертационным советом Д002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), 125047, Москва, Миусская пл., д.4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Рагимли Парвин Ильгар кызы** 1990 года рождения.

В 2013 г. соискатель окончила магистратуру Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Бакинский Государственный Университет» по направлению «Математика».

В 2018 г. соискатель окончила очную аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

В настоящее время соискатель работает в должности инженера в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Диссертация выполнена в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Научный руководитель:

Повещенко Юрий Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела № 11 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Официальные оппоненты:

Суетнова Елена Ивановна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической геофизики отделения планетарной геофизики и геодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук,

Семенов Илья Витальевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела вычислительных методов и турбулентности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматизации проектирования Российской академии наук, дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа - Югра «Сургутский государственный университет» (СурГУ), г. Сургут, в своем **положительном** отзыве, подписанном д.ф.-м.н., профессором **Галкиным Валерием Алексеевичем**, профессором кафедры прикладной математики СурГУ, и утвержденном кандидатом технических наук, доцентом **Даниленко Иваном Николаевичем**, и.о. ректора СурГУ, указала, что диссертационная работа

Рагимли Парвин Ильгар кызы «Математическое моделирование связанных процессов фильтрации в талой зоне и в пьезопроводной среде с газогидратными включениями» удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор заслуживает присуждения указанной степени.

В отзыве отмечено, что значимость работы заключается в создании программных средств, обеспечивающих возможность пространственно-одномерного моделирования полной задачи диссоциации газовых гидратов в подземных пористых средах. Полученные в работе результаты и разработанное программное обеспечение могут быть использованы при исследовании и прогнозировании процессов намерзания и растаивания гидратов в газопроводах и добывающих скважинах.

В качестве замечаний было отмечено следующее:

1. В работе рассматривается решение задач с помощью двух схем: полностью неявная по давлению и насыщенностям и предложенная автором полностью консервативная разностная схема. Интересно было бы видеть сравнение по быстродействию и эффективности данных схем, а также сравнение с решением аналогичных задач по уже известному методу с использованием алгоритма прогонки, без разбиения по физическим процессам.

2. Практически на данный момент автором предоставлена возможность проводить пространственно-одномерные расчеты трансфазных задач, но разработанная разностная схема рассчитана на двух- и трехмерное моделирование. Хотелось бы иметь представление, насколько сложно разработать двух- и трехмерный код на основе реализованного одномерного.

Соискатель имеет 9 опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий,

рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций, или входящих в одну из международных баз данных и систем цитирования Scopus, Web of Science. Работы соискателя по теме диссертации:

1. Рагимли П.И., Повещенко Ю.А., Рагимли О.Р., Подрыга В.О., Казакевич Г.И., Гасилова И.В. Использование расщепления по физическим процессам для численного моделирования диссоциации газовых гидратов. Математическое моделирование. 2017, том 29, №7, с. 133-144.
Перевод: Rahimly P.I., Poveshchenko Yu.A., Rahimly O.R., Podryga V.O., Kazakevich G.I., Gasilova I.V. The use of splitting with respect to physical processes for modeling the dissociation of gas hydrates. Mathematical Models and Computer Simulations. 2018, v. 10, № 1, p. 69-78.
2. Рагимли П.И., Повещенко Ю.А., Казакевич Г.И., Бойков Д.С., Гасилова И.В. Модель флюидодинамики в пористой среде, содержащей газогидраты. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2016, № 119, 17 с.
3. Повещенко Ю.А., Подрыга В.О., Рагимли П.И. Об одном подходе свободно-объемной аппроксимации пьезопроводной среды с газогидратными включениями. Mathematica Montisnigri. 2017, т. 40, с. 68–89.
4. Рагимли П.И., Шарова Ю.С., Рагимли О.Р., Подрыга В.О., Гасилова И.В., Попов С.Б., Повещенко Ю.А. Моделирование некоторых задач флюидодинамики с газогидратными включениями на основе расщепления по физическим процессам. Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018, № 39. 27 с.
5. Рагимли П.И., Повещенко Ю.А., Подрыга В.О., Рагимли О.Р., Попов С.Б. Моделирование процессов совместной фильтрации в талой зоне и пьезопроводной среде с газогидратными включениями. Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018, № 40. 32 с.
6. Poveshchenko Yu.A., Podryga V.O., Rahimly P.I., Sharova Yu.S. About one discrete model of splitting by the physical processes of a piezoconductive medium

with gas hydrate inclusions. Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2018, v.946, p.012077.

7. Рагимли П.И. Комплекс программ для моделирования многофазных течений в коллекторах с газогидратными включениями // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 103. 20 с. doi:10.20948/prepr-2018-103 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-103>
8. Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Повещенко Ю.А., Казакевич Г.И., Рагимли П.И. Гидродинамическое моделирование гидратного месторождения. Журнал Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2017, № 2. С. 30-35.
9. Попов И.В., Повещенко Ю.А., Поляков С.В., Рагимли П.И. Об одном подходе к построению консервативной разностной схемы для задачи двухфазной фильтрации. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2017, № 69, 12 с.

В совместных работах автором рассмотрена математическая модель диссоциации газовых гидратов в пористых средах, которая расщеплена на два функциональных блока, самостоятельно разработан численный метод решения одномерных задач в рамках этой модели [1, 2]. Автором самостоятельно выполнена численная апробация построенного алгоритма на задаче многокомпонентных флюидодинамических течений с твердофазными гидратными включениями в пористой среде [3, 5, 6]. Автором разработан комплекс программ с использованием вычислительной архитектуры «Клиент-сервер», позволяющий моделировать динамику течения в пористой гидратосодержащей среде [7]. В работах [8, 9] автором описаны разработанные алгоритмы расчета задач флюидодинамики с газогидратными включениями на основе расщепления по физическим процессам.

Научные статьи отражают основные результаты диссертационного исследования. Недостоверные сведения в тексте диссертации об опубликованных соискателем работах отсутствуют. Общий объем публикаций 12,5 п.л., авторский вклад соискателя 6,9 п.л.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Положительный отзыв официального оппонента д.ф.-м.н.

Суетновой Е.И. В отзыве указаны следующие замечания:

1. В работе для расчетов трансфазных состояний дискретной среды, предложен некоторый набор алгоритмов: метод двойной каркасности, метод перегретого растепления и метод переохлажденной талой зоны. Однако, конкретные расчеты в 5 главе диссертации проводились только методом двойной каркасности. Представляет интерес численное исследование и других в теоретическом отношении” разработанных в диссертации эволюционных трансфазных алгоритмов с перегретым растеплением и переохлажденной талой зоной.

2. Трансфазные алгоритмы, предложенные в работе, рассчитывают эволюционные переходы только между кривой трехфазного фазового равновесия и талой зоной, состоящей из воды и газа, где гидрат отсутствует. Представляет интерес также разработка и исследование алгоритмов по другую сторону от кривой фазового равновесия, т.е. переходы между трехфазным состоянием и двухфазной зоной, состоящей только из гидрата и воды или гидрата и газа. Разработка эволюционных трансфазных алгоритмов такого рода могла бы быть проведена в дальнейшем.

Положительный отзыв официального оппонента к.ф.-м.н.

Семенова И.В. В отзыве указаны следующие замечания:

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, т.к. очень трудно определить соответствие между графиками и моментами времени.

6. Объяснение пиков температуры в талой зоне на рисунке 5.16 требует дополнительного анализа, т.к. 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.

Положительный отзыв на автореферат доктора физико-математических наук, **Каракина Андрея Владимировича**, старшего научного сотрудника ИПМ им. М.В.Келдыша РАН.

В отзыве указано следующее замечание:

Есть некоторые терминологические неточности. Закон фильтрации Маскета-Леверетта для многофазной фильтрации назван законом Дарси. Водные и газовые фазы названы компонентами, которые присущи растворам, а не гетерогенным средам.

Положительный отзыв на автореферат доктора физико-математических наук, **Колдобы Александра Васильевича**, профессора, ведущего научного сотрудника, руководителя лаборатории флюидодинамики и сейсмоакустики МФТИ (ГУ).

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Во введении на стр.3 говорится о метастабильном фазовом поведении газовых гидратов, а далее в работе используется предположение о фазовом равновесии и ничего не сказано о кинетических моделях, которые широко используются при моделировании фазовых превращений газовых гидратов в пористой среде.

2. Применяемый авторами термин «расщепление по физическим процессам» применительно к расщеплению системы уравнений на уравнения для водонасыщенности и давления неточен, т.к. в уравнении для давления присутствует вклад физических процессов, определяющих баланс водонасыщенности.

3. Есть проблемы с изложением результатов. Автор почему-то отступает от принятой терминологии: вместо термина «насыщенность» периодически используется «сатурация», «диссоциация» - растепление», «фазовое равновесие» - «термобарическое равновесие» и т.п. Это затрудняет чтение автореферата и, по-видимому, и работы в целом. Кроме того, при описании результатов численного моделирования под «точным решением» имеется в виду «эталонное решение», полученное численно на подробной расчетной сетке.

4. К сожалению, разработанные вычислительные алгоритмы удалось реализовать только в одномерной постановке.

Положительный отзыв на автореферат доктор технических наук **Хавкина Александра Яковлевича**, профессора кафедры Нефтегазовая и подземная гидромеханика РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Отзыв не содержит замечаний.

Положительный отзыв на автореферат кандидата технических наук, **Васильевой Зои Алексеевны**, доцента кафедры Разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

В отзыве указано следующее замечание: не проведено сравнение расчетов по предлагаемой схеме с расчетами на популярных симуляторах, например, в комплексе CMG STARS.

В отзывах отмечается, что приведенные замечания не снижают общей ценности работы. По актуальности решаемой проблемы, научной новизне, научной и практической значимости, достоверности научных результатов диссертация удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широко известной компетенцией в вопросах математического моделирования, разработки численных методов, алгоритмов их решения и комплексов программ, в том числе в области исследования многокомпонентных флюидодинамических течений с фазовыми переходами, что подтверждается многочисленными публикациями.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **Развита** самосогласованная модель совместной фильтрации в гидратизированной флюидодинамической среде с твердофазными включениями и в талой зоне.

2. **Построено** семейство двухслойных полностью консервативных разностных схем с профилированными по пространству временными весами для расчета процессов в талой зоне и пьезопроводной среде с газогидратными включениями. Такие разностные схемы сохраняют общую внутреннюю энергию системы.

3. Применительно к задачам фильтрационной флюидодинамики с газогидратными включениями, в частности, с разрывными свойствами пласта и сложной разномасштабной структурой коллекторной зоны **разработан** новый класс операторно-согласованных разностных схем решения начально-краевых задач для уравнений параболического типа на пространственных неструктурированных сетках общего вида.

4. В пространственно-одномерном случае **осуществлена** программная реализация разработанного численного метода в виде робастного программного комплекса.

5. **Получены** результаты численного исследования процессов, происходящих в газогидратных пластах, в частности, при гидродинамическом моделировании газогидратного Мессояхского месторождения. Исследованы задачи фильтрационной флюидодинамики с твердофазными включениями. Осуществлен совместный трансфазный расчет с динамически изменяющимися во времени пространственными локализациями различного числа фаз.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что созданные программные средства обеспечивают возможность пространственно-одномерного моделирования полной задачи диссоциации газовых гидратов в подземных пористых средах. Разработанное программное обеспечение несмотря на использование пространственно-одномерной модели позволяет исследовать и прогнозировать процессы намерзания и

растаяния (растепления) гидратов в реальных газопроводах и добывающих скважинах месторождений Восточной Сибири и Арктического шельфа .

Теоретическая значимость результатов работы заключается в разработке и исследовании модели фильтрации в сложно устроенной гетерогенной среде, включающей в себя гидраты, твердый скелет и талые воды.

Достоверность полученных результатов основывается на использовании строгого математического аппарата – классических законах подземной гидромеханики, термодинамики и теории фильтрации. Достоверность обеспечивается верификацией разностных схем в численных экспериментах на модельных задачах и близостью к результатам других исследований.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в выборе математической модели, построении новых схем и методик для разработки вычислительного алгоритма и исследовании многокомпонентных флюидодинамических течений с твердофазными гидратными включениями в пористой среде. Соискатель самостоятельно разработала программное обеспечение, позволяющее моделировать течение флюидов в рамках термодинамически равновесной совместной модели двухкомпонентной трехфазной (вода, газ, гидрат) фильтрационной флюидодинамики и двухфазных процессов в талой зоне с отсутствием газогидратов, провела его отладку и тестирование. Результаты расчетов, проведенных автором с помощью разработанного ПО, показывают эффективность разработанных методов для расчета реальных задач, связанных с залежами газогидратов (в частности, применительно к Мессояхскому газогидратному месторождению), а также для исследования сложных трансфазных процессов и динамики газо- и гидратонасыщенности в пласте. При непосредственном участии соискателя проходила подготовка основных публикаций по выполненной работе.

Диссертационное исследование представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой разработан новый метод

моделирования фильтрационных процессов в пористой среде с учетом фазовых превращений газовых гидратов. Результаты исследования имеют существенное значение для эксплуатации месторождений с аномальными свойствами, содержащих природные и техногенные газогидраты.

Диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, отвечает требованиям, предъявляемым ВАК при Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, а автор работы Рагимли Парвин Ильгар кызы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании 11 октября 2018 года диссертационный совет принял решение присудить Рагимли П.И. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета

Д 002.024.03, академик РАН

Б. Н. Четверушкин

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 002.024.03, к.ф.-м.н.

М. А. Корнилина

13 декабря 2018 года