ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.061.02 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕНОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета **Д 003.061.02** от 17.01.2017 № 1

О присуждении Белозерову Александру Александровичу, гражданину Российской Федерации, **ученой степени кандидата** физико-математических **наук**.

Диссертация «Консервативная модель и численные методы для течений многофазных сжимаемых сред» **по специальности** 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ **принята к защите** 18 октября 2016 года, **протокол** № 9, **диссертационным советом** Д 003.061.02 **на базе** Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН), 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, созданным приказом № 105/нк Минобрнауки России от 11.04.2012 г.

Соискатель Белозеров Александр Александрович 1990 **года рождения** в 2013 году **окончил** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет». В период подготовки диссертации обучался в очной аспирантуре механико-математического факультета Федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет». Предположительный год окончания аспирантуры – 2017.

Диссертация выполнена на кафедре гидродинамики механико-математического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет».

Научный руководитель – доктор физико-математических **наук** Роменский Евгений Игоревич работает в лаборатории дифференциальных уравнений и смежных вопросов анализа (Д4) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук **в должности** главного научного сотрудника.

Официальные оппоненты:

1. Имомназаров Холматжон Худайназарович, доктор физико-математических наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией математических задач геофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;

2. Краснопольский Борис Иосифович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории общей аэродинамики Научно-исследовательского института механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» **дали положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск **в своем положительном отзыве, подписанном** Тереховым Владимиром

Викторовичем, профессором, доктором физико-математических наук, и.о. заведующего лаборатории термогазодинамики и Пахомовым Максимом Александровичем, профессором, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории термогазодинамики, утвержденном Алексеенко Сергеем Владимировичем, академиком РАН, доктором физико-математических наук, директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, **указала, что** тема диссертационной работы является актуальной и относится к востребованной области исследований. Отмечается, что полученные результаты имеют значимость как с точки зрения развития теории моделирования многофазных сред, так и с точки зрения возможного применения для решения прикладных задач. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук в соответствии с «Положением о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Белозеров Александр Александрович заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соискатель имеет 6 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 6 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях 4. Опубликованные работы представляют собой статьи в научных журналах, рецензируемые труды конференций и тезисы научных докладов общим объемом 52 страницы.

В работах описано построение и анализ свойств рассмотренных в диссертации математических моделей: общей модели течений многофазных сжимаемых сред с произвольным количеством фаз и нестационарной одномерной осредненной модели газожидкостных трубных течений. Описаны используемые численные методы, изложены этапы построения

вычислительных алгоритмов и приведены результаты численных экспериментов, включая: решение задачи о распаде разрыва для модели многофазной среды на примере четырехфазной смеси; решение серии тестовых задач для осредненной одномерной модели для воспроизведения различных типов трубных течений.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. E. Romenski, A.A. Belozerov, and I.M. Peshkov. Conservative formulation for compressible multiphase flow // Quarterly of Applied Mathematics. – 2016. – Vol. 74. – N. 1. – P. 113-136.

Авторский вклад в данной работе заключается в участии в формулировке определяющих уравнений модели смеси с произвольным количеством фаз и обосновании свойства гиперболичности. Лично автором осуществлена разработка численного алгоритма и программы для решения одномерных задач, в том числе задачи Римана о распаде разрыва. Постановка тестовых задач, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов решения задач о соударении, разлете и «нефтяной смеси» выполнены автором лично.

Вклад Роменского Е.И. состоит: в постановке задачи обобщения модели двухфазного течения на случай смеси с произвольным конечным количеством фаз; проверке и корректировке результатов; в консультировании по теории термодинамически согласованных систем, применяемой для решения поставленных задач; в определении приоритетов при выборе методов для построения численного алгоритма; в выборе класса задач, используемых для валидации модели; в обсуждении результатов численных экспериментов и принятии заключения об их достоверности.

Вклад Пешкова И.М. заключается: в консультировании на этапе построения определяющих уравнений математической модели и обоснования их свойств; в участии в обсуждении результатов численных экспериментов и корректировке постановок тестовых задач, рассмотренных в работе.

2. E. Romenski, A. Belozerov, I.M. Peshkov. Thermodynamically compatible hyperbolic conservative model of compressible multiphase flow: Application to four phase flow // AIP Conference Proceedings. – 2013. – Vol. 1558. – P. 120-123.

Авторский вклад в данной работе заключается в участии в формулировке математической модели. Лично автором выполнена разработка и программная реализации вычислительных методов, проведены численные эксперименты и анализ результатов вычислений, приведенных в работе.

Вклад Роменского Е.И. заключается в постановке задач построения математической модели и вычислительных алгоритмов, в обсуждении результатов.

Вклад Пешкова И.М. заключается в участии в обсуждении результатов численных экспериментов и корректировке постановок тестовых задач.

3. А.А. Белозеров, Е.И. Роменский, Н.А. Лебедева. Моделирование течений сжимаемой газожидкостной смеси в трубах на основе теории термодинамически согласованных систем // Сибирский журнал чистой и прикладной математики (старое название: Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика). – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 40-56.

Авторский вклад в данной работе заключается в участии в постановке задачи и построении осредненной одномерной нестационарной модели трубных газожидкостных течений. Автором лично разработаны вычислительные алгоритмы на базе методов Рунге-Кутты-TVD, Рунге-Кутты-WENO и их модификаций; разработан комплекс программ для решения начально-краевых задач для одномерных трубных течений, проведен анализ результатов вычислений для тестовых задач, в том числе: задача «Water Faucet», задача о V-трубе, задача о течении газожидкостной смеси в горизонтальной трубе.

Вклад Роменского Е.И. заключается: в участии в постановке задачи о построении осредненной одномерной нестационарной модели трубных

газожидкостных течений; в консультировании по вопросам применения высокоточных методов решения гиперболических систем и другим теоретическим аспектам построения численного алгоритма.

Вклад Лебедевой Н.А. заключается: в консультировании по теоретическим аспектам построения математических моделей трубных течений и прикладным задачам моделирования газожидкостных течений в нефтегазовой отрасли; в определении класса тестовых задач для валидации модели; в проверке результатов численных экспериментов; в экспертизе программного кода.

4. Belozerov A., Romenski E., Lebedeva N. Conservative model and numerical simulations of compressible two-phase pipe flows // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1738. – N. 1.

Авторский вклад в данной работе заключается в участии в формулировке математической модели. Лично автором проведена процедура осреднения трехмерных уравнений двухфазной смеси, выполнено построение численных методов и разработка комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов с целью верификации модели и методов. Проведены расчеты и выполнен анализ результатов решения тестовых задач: задача «Water Faucet», задача сепарации, задача о V-трубе.

Вклад Роменского Е.И. заключается в участии в постановке задачи, а также в обсуждении вопросов построения численного алгоритма на основе высокоточных методов.

Вклад Лебедевой Н.А. заключается в консультировании по теоретическим аспектам построения математических моделей трубных течений и прикладным задачам моделирования газожидкостных течений в нефтегазовой отрасли; в определении класса тестовых задач; в экспертизе программного кода.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

На автореферат поступило 3 отзыва. Все отзывы положительные, содержат ряд замечаний. В отзывах отмечается актуальность темы

диссертационной работы, научная новизна, а также теоретическая и практическая ценность полученных результатов. Отмечено, что диссертационное исследование отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и соответствует специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

1. Отзыв на автореферат, подписанный к.ф.-м.н. Куликовым И.М., научным сотрудником лаборатории параллельных алгоритмов решения больших задач Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск. Отзыв положительный, содержит замечания:

Автореферат имеет некоторые несущественные недостатки:

1) Так в описании раздела 1.1 на странице 8 не описан член e_j, который по всей видимости описывает внутреннюю энергию j-й фазы.

2) В разделе 2.1 на странице 10 используется фраза «закон сохранения энтропии», которую более правильно с учетом уравнений (1) использовать в виде «закон неубывания энтропии».

3) Англоязычное название первой задачи «Задача Water Faucet» раздела 3.3 на странице 12 может быть записано на русском языке как «Задача о водопроводном кране».

2. Отзыв на автореферат, подписанный д.ф.-м.н. Доровским В.Н., техническим советником Новосибирского технологического центра Бейкер Хьюз, г. Новосибирск. Отзыв положительный, содержит замечания:

Следует отметить недостатки в изложении материала диссертационной работы в автореферате. Не обсуждаются ограничения принятой модели. Другими словами, не четко выделен объект исследования с точки зрения гидродинамического описания. Например, принятый в модели принцип локальной аддитивность внутренней энергии, а, следовательно, и энтропии

по подсистемам, ограничивает распространение модели на случай растворения газовой фазы или растворения примесей. Не отражается ограничение теории на случай исследования течений многофазных сред в трубах, расположенных под малыми углами к горизонту. Экспериментально известно, что течение в поперечном сечении трубы в этом случае расслаивается с выделением промежуточного слоя, «кинетика» формирования которого требует иных гидродинамических средств описания. Нет комментариев по поводу введения индивидуального давления в каждой фазе: центральный принцип гидродинамического описания - принцип локального термодинамического равновесия гласит - локально температуры в фазах равны, давления в фазах, также, равны (следствие из правила фаз Гиббса). В противном случае необходимы дополнительные комментарии. Также следует отметить отсутствие ссылок на ранние работы других авторов, уравнение которых также гиперболические в обратимом гидродинамическом приближении, но снято ограничение на требование локальной аддитивности внутренней энергии и энтропии.

3. Отзыв на автореферат, подписанный к.ф.-м.н. Перепечко Ю.В., старшим научным сотрудником Лаборатории моделирования динамики эндогенных и техногенных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН» (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск. Отзыв положительный, содержит замечания:

В качестве замечаний следует отметить, что в работе не обсуждается роль поверхностного натяжения в формировании пробкового режима течения газожидкостного потока, вызываемого неустойчивостью стратифицированного течения, а также возможность использования поверхностных явлений для количественного согласования результатов расчетов и экспериментов в задаче о течении газожидкостной смеси в горизонтальной трубе. В автореферате также не отражены возникающие в

силу принятых предположений ограничения на область применения разработанных моделей многофазных сред.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в области математического моделирования и разработки численных методов решения задач моделирования динамики многофазных сред, наличием публикаций в указанных сферах исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны математические модели, вычислительные алгоритмы и комплексы программ для численного моделирования процессов переноса в многофазных сжимаемых средах; трубных газожидкостных течений;

предложены: новая термодинамически согласованная математическая модель многофазной сжимаемой смеси с произвольным количеством фаз в одноэнтропийном приближении, определяющие уравнения которой имеют дивергентную форму и образуют гиперболическую систему; одномерная осредненная нестационарная модель двухфазных газожидкостных течений в трубах;

доказана перспективность использования развиваемого подхода для моделирования динамики газожидкостных смесей в трубопроводных системах, в том числе для описания сложных переходных течений с образованием пробкового режима;

введены новые термодинамические переменные и потенциал (обобщенная внутренняя энергия смеси) для модели течений многофазных сжимаемых сред с произвольным количеством фаз.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны: положение о возможности построения общей модели течений многофазных сжимаемых сред с произвольным количеством фаз в предположении общей энтропии смеси, обладающей свойствами

термодинамической согласованности, дивергентности и гиперболичности системы определяющих дифференциальных уравнений; положение о возможности построения на основе подхода термодинамически согласованных систем осредненной одномерной модели для описания динамики трубных газожидкостных течений;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы принцип построения математических моделей механики сплошных сред, основанный на теории термодинамически согласованных гиперболических систем законов сохранения; комплекс современных эффективных численных методов решения систем дифференциальных уравнений в форме законов сохранения, основанных на методе конечных объемов;

изложены этапы построения общей математической модели течений многофазных сжимаемых сред в одноэнтропийном приближении; доказательство принадлежности предложенной системы дифференциальных уравнений к семейству симметрических гиперболических по Фридрихсу систем; этапы построения осредненной одномерной модели трубных течений;

раскрыты фундаментальные свойства изучаемых уравнений, позволяющие применить эффективные численные методы и обеспечивающие корректность начально-краевых задач в широкой области изменения физических параметров;

изучено влияние различных способов учета эффектов межфазного взаимодействия на картину течения (в частности, на периодический характер трубных течений), на сходимость и точность вычислительных алгоритмов;

проведена модернизация численных методов Рунге-Кутты-TVD и Рунге-Кутты-WENO путем включения в вычислительные алгоритмы метода «частичного расщепления» исходной системы для учета диссипативных процессов, а также схемы для объемных концентраций, сохраняющей

однородный фон начальных данных. Проведена адаптация используемых численных методов для решения изучаемых дифференциальных уравнений.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены (указать степень внедрения) вычислительные алгоритмы и их программная реализация для численного анализа течений многофазных сжимаемых сред и газожидкостных трубных течений. Созданный комплекс методик и научно-исследовательских программ моделирования течений многофазных сжимаемых смесей используется в лаборатории дифференциальных уравнений и смежных вопросов анализа Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН;

определены перспективы практического использования разработанных математических моделей для исследования задач транспортировки газожидкостных смесей по трубопроводам;

создан комплекс программ, предусматривающий возможность решения начально-краевых задач о течениях в трубах различной геометрии с использованием различных методик учета межфазного взаимодействия и различных численных методов;

представлены выводы о применимости предложенных моделей для решения ряда важных с практической точки зрения задач моделирования пробковых трубных течений; направления дальнейшего совершенствования разработанных математических моделей, алгоритмов и программных средств.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ показана согласованность результатов численных экспериментов с опубликованными в литературе результатами, а также с выводами, полученными на основе анализа свойств рассматриваемых уравнений; результаты получены с использованием современных средств разработки ПО, анализа и визуализации данных;

теория построена на известном подходе к построению и анализу математических моделей в механике сплошных сред; на использовании общепринятых численных методов;

идея базируется на анализе практики применения теории термодинамически согласованных гиперболических систем законов сохранения для построения моделей двухфазных сред;

использовано сравнение результатов численных экспериментов с аналитическими решениями упрощенных моделей изучаемых явлений;

установлена высокая степень качественной и количественной согласованности полученных результатов с результатами, представленными в независимых источниках;

использованы опубликованные в современной литературе постановки тестовых задач.

Личный вклад соискателя состоит в формулировке и анализе новых математических моделей: термодинамически согласованной модели течений многофазной сжимаемой смеси с произвольным количеством фаз; осредненной одномерной модели газожидкостных трубных течений. Лично автором разработаны вычислительные алгоритмы на основе методов Рунге-Кутты-WENO и Рунге-Кутты-TVD и их модификации, создан комплекс научно-исследовательских программ, проведена его отладка и тестирование. Проведение численных экспериментов, обработка и интерпретация результатов расчетов, демонстрирующих состоятельность разработанных моделей, подготовка публикаций и докладов по результатам работ выполнены автором лично.

На заседании 17 января 2017 года **диссертационный совет принял решение присудить** Белозерову А.А. **ученую степень кандидата** физико-математических **наук.**

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 13 докторов наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ,

участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель
диссертационного совета Д 003.061.02 Кабанихин
д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН Сергей Игоревич

Ученый секретарь
диссретационного совета Д 003.061.02 Сорокин
д.ф.-м.н., доцент Сергей Борисович

Дата оформления Заключения «17» января 2017 г.