

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,
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 16 ноября 2023 г. № 12

О присуждении **Алексееву Михаилу Владиславовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Математическое моделирование термомеханических процессов в многофазных средах» по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 22.06.2023 (протокол заседания №12/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным 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. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки РФ от 24 февраля 2021 г. № 118.

Соискатель **Алексеев Михаил Владиславович**, 31 мая 1992 года рождения, в 2016 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» с присвоением

квалификации магистр по направлению подготовки 03.04.01 – «Прикладные математика и физика».

В 2020 году соискатель окончил аспирантуру Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» по специальности 09.06.01 – «Информатика и вычислительная техника». С 2016 по 2023 год работал младшим научным сотрудником в «Федеральном исследовательском центре Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук». В настоящее время работает старшим разработчиком в ООО «ТС Интеграция».

Диссертация выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Научный руководитель – Савенков Евгений Борисович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела №11 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

Колдоба Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой моделирования и технологий разработки нефтяных месторождений Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»,

Серёжкин Алексей Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном **Поляниным Андреем Дмитриевичем**, доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником, и **Федюшкиным Алексеем Ивановичем**, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником, указала, что диссертационная работа Алексева Михаила Владиславовича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. В диссертационной работе сформулирована полностью неравновесная чисто эйлера математическая модель типа Баера-Нунциато, пригодная для описания многофазной среды с гиперупругим поведением фаз. Предложен вычислительный алгоритм решения гиперболических систем уравнений многофазных моделей с неконсервативными слагаемыми с использованием новой многосоставной схемы лимитирования простых и консервативных переменных и его параллельная программная реализация. Полученные автором результаты вносят важный вклад в развитие методов математического моделирования термомеханических и гидродинамических процессов в многофазных средах, что соответствует п.9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соискатель имеет 11 опубликованных работ по теме диссертации, из них в изданиях, входящих в Перечень ВАК – 7 работ, индексируемых в Web of Science – 1, в SCOPUS – 5, в трудах конференций – 2.

Наиболее значимые работы соискателя:

1. Алексеев М.В. Численное моделирование двухфазных течений в рамках релаксационной модели Баера-Нунциато // Вычислительные методы и программирование. – 2023. – Т. 24. С. 182-194.

2. Полехина Р., Алексеев М., Савенков Е. Валидация вычислительного алгоритма на основе разрывного метода Галеркина для релаксационной модели Баера-Нунциато // Дифференциальные уравнения – 2022. – Т. 58. – № 7. – С. 977-994.

3. Алексеев М.В., Савенков Е.Б. Математическая модель двухфазной гиперупругой среды. «Скалярный» случай // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. 2022. № 40. 63 с.

4. Alekseev M., Savenkov E. Runge–Kutta discontinuous Galerkin method for Baer–Nunziato model with «simple WENO» limiting of conservative variables // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2021. – Vol. 36. – № 2. – pp. 57-74.

5. Тухватуллина Р. Р., Алексеев М. В., Савенков Е. Б. Численное решение уравнений релаксационной модели Баера-Нунциато с помощью разрывного метода Галеркина // Дифференциальные уравнения. – 2021. – Т. 57. – № 7. – С. 988-1002.

6. Алексеев М.В., Савенков Е.Б., Воронин Ф.Н. Численное решение уравнений Баера-Нунциато разрывным методом Галеркина // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2020. – № 48. – 23 с.

7. Алексеев М.В., Савенков Е.Б. Применение разрывного метода Галеркина для решения одномерных гиперболических задач гиперупругости в неоднородной среде // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2019. – № 88. – 20 с.

Личный вклад соискателя в работах [2, 4–6] заключается в постановке ряда тестовых задач, разработке вычислительных алгоритмов, разработке части программного комплекса, проведении ряда вычислительных экспериментов; в работе [7] — в разработке математической модели и программного комплекса; в работе [3] — в разработке математической модели и исследовании ее частных случаев. Работа [1] является персональной работой соискателя.

Научные статьи отражают основные результаты диссертационной работы. Сведения об опубликованных соискателем работах достоверны.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы ведущей организации, отзывы оппонентов, а также 2 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. Отзывы содержат ряд замечаний:

В отзыве ведущей организации **ИПМех РАН**:

1. В главе 2, стр.51-52, введены понятия «вторых» интерфейсных скорости и давления, физический смысл которых не раскрывается.

2. В вычислительной части работы (глава 4) автор рассматривает алгоритмы для решения гиперболических систем уравнений и их программную реализацию. Однако гиперболичность предложенной в главе 2 гиперупругой многофазной модели автором не показана.

3. В работе представлена новая многофазная модель для описания динамики сред с гиперупругим поведением фаз. Показано, что построенная модель обобщает известные ранее модели с шаровым тензором напряжений. Для варианта последних приводятся результаты расчетов. Однако расчеты с применением непосредственно предложенной автором многофазной гиперупругой модели в работе не представлены.

4. Заложенные в программную реализацию возможности, а именно, автоматическое дифференцирование, в принципе позволяют авторам проводить расчеты течений с широким набором уравнений состояния, задаваемых соответствующим термодинамическим потенциалом. Было бы уместно привести в работе примеры таких расчетов в рамках одной гидродинамической модели течения среды. Кроме того, было бы интересно применить созданный программный комплекс к истинно трехмерным задачам, а не только к формально трехмерным, но по сути осесимметричным задачам, рассмотренным в главе 6 (прохождение плоской ударной волны через изначально сферический пузырек).

5. Присутствует ряд упущений при оформлении результатов расчетов. В частности, отсутствует единый стиль оформления рисунков, в

ряде случаев отсутствует обозначение координатных осей (например, рис. 6.1), не всегда хорошее качество визуализации (например, рис. 6.6)

В отзыве официального оппонента, д.ф.-м.н. Колдобы А.В.:

1. Обзор литературы можно было бы сократить за счет устранения повторов.

2. Вывод уравнений модели представляется излишне формальным. Было бы полезно, по возможности, прокомментировать физический смысл неконсервативных слагаемых. Не ясно, в частности, какие из них отвечают за моделирование поверхностных эффектов (энергию, энтропию и пр. межфазных границ)

3. Для верификационных расчетов не проводится исследование численной сходимости. Целесообразным было бы продемонстрировать фактический порядок разрывного метода Галеркина при расчете гладких решений.

4. Автор использует алгоритмы на основе лимитирования простых и консервативных переменных моделей. Вместе с тем, в значительном числе работ, посвященных численному решению гиперболических систем уравнений, используется лимитирование характеристических переменных. В работе отсутствуют результаты, явно демонстрирующие сравнительные достоинства и недостатки указанных подходов.

5. Работа содержит опечатки (см. стр.14, 22, 29, 30 и др.).

В отзыве официального оппонента Сережкина А.А.:

1. В Главе 2 при выводе физико-математической модели автор постоянно меняет обозначение фаз с цифрового обозначения (1) и (2) к буквенному p и r при том, что весь вывод можно привести в едином формате обозначений. Вывод модели сделан корректно, но смена формата обозначений усложняет восприятие.

2. В параграфе 2.3 при сопоставлении выведенной модели с известными равновесными моделями (например, с моделью Капиллы) автор показывает, что равновесные модели могут быть редуцированы из выведенной модели

выбором определенных замыкающих соотношений. В то же время физически обоснованный вывод равновесной модели предполагает строгий асимптотический анализ полных неравновесных уравнений, который в работе отсутствует.

3. В работе приведено описание разработанного автором программного комплекса. Однако его возможности в полной мере не демонстрируются. В частности, не приводятся результаты, демонстрирующие эффективность распараллеливания и зависимости скорости расчета от числа потоков исполнения.

4. В главе 6 не представлено сравнение результатов тестовых расчетов с расчетами, приведенными в опубликованных работах других авторов. Было бы желательно в явном виде показать данные сравнения. Кроме того, присутствуют недочеты оформления и представления результатов. Например, распределения полей на рис. 6.6. (стр.94) мало информативны – более информативны были бы одномерные графики распределения расчетных величин.

В отзыве на автореферат Кувыркина Г.Н., доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой ФН-2 «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»:

1. При выводе модели автор активно использует подход, разработанный в рамках школы рациональной термомеханики сплошной среды К. Труследа, в частности, так называемую процедуру Колмана-Нолла. Вместе с тем, известны и другие формальные методы феноменологической термомеханики, пригодные для построения моделей рассматриваемого класса, например, формализм построения моделей многоскоростного континуума, развитый в работах А. М. Блохина и В. Н. Доровского, или вариационные методы построения моделей и формализм термодинамически согласованных систем законов сохранения, развитый в работах С. К. Годунова, Е. И. Роменского и

др. Хотя бы краткое упоминание и сравнительный анализ упомянутых подходов в обзорной части работы был бы более чем уместен.

В отзыве на автореферат Гафарова Б.Р., кандидата технических наук, и.о. начальника отдела ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз»:

1. Из автореферата неясно, насколько применимы разработанные автором модели поведения мультифазных сред и программный комплекс к описанию свойств эластомерных синтактных пен, применяемых на практике в качестве демпфирующих материалов для защиты конструкций от высокоинтенсивных импульсных воздействий.

Соискатель согласился с замечаниями, содержащимися в письменных отзывах, и дал комментарии в необходимых случаях.

Так, он отметил, что хотя гиперболичность рассматриваемой системы уравнений не доказывается (2 замечание ведущей организации), но предполагается в силу гиперболичности ее однофазного аналога. А отсутствие результатов расчетов (3 замечание ведущей организации) объясняется сложностью модели и невозможностью получить все необходимые для нее параметры.

В ответе на замечания оппонента Колдобы А.В. соискатель сообщил, что при выводе модели учитываются только быстропротекающие процессы, при которых поверхностные эффекты можно не учитывать. Кроме того, Алексеев М.В. также отметил, что хотя на уровне фазы каждая из систем уравнений является неконсервативной, на смесевом уровне общая модель является консервативной. А физический смысл неконсервативных слагаемых, известных в литературе как *pozzling term*, заключается в том, что они отвечают за межфазное взаимодействие на границе раздела фаз.

В контексте 2 замечания оппонента Сережкина А.А. соискатель сообщил, что в своей работе он показал соответствие выведенной модели неравновесной модели из работы Капиллы, из которой последний потом получает равновесный вариант.

В связи с замечанием Гафарова Б.Р. в отзыве на автореферат соискатель сообщил, что при выводе модели предполагалась ее применимость в том числе к синтактным пенам.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается квалификацией и большим опытом в областях математического моделирования механики и термодинамики сплошной среды, разработки и анализа численных методов и создания параллельных программных комплексов, а также применения методов и средств математического моделирования для решения сложных научно-практических задач, что подтверждается публикациями официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **Разработаны** математические модели для описания многофазных гидродинамических течений с прямым разрешением границ раздела фаз. Полученные модели допускают гиперупругое поведение каждой из фаз.

2. **Разработаны и исследованы** вычислительные алгоритмы для решения задач многофазной гидродинамики в рассматриваемом классе постановок.

3. **Разработан** параллельный программный комплекс для моделирования задач многофазных гидродинамических течений с прямым разрешением границ раздела фаз в реалистичных постановках.

4. **Выполнены** валидация и верификация разработанных математических моделей, алгоритмов и их программной реализации.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке математических моделей для описания динамики многофазных сред и соответствующих вариантов алгоритмов разрывного метода Галеркина.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики заключается в том, что разработан программный комплекс, обеспечивающий возможность анализа задач в реалистичных постановках.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием современных представлений механики, самосогласованных и непротиворечивых математических моделей, которые строятся на основе фундаментальных законов механики с использованием методов рациональной термодинамики; использованием апробированных методов вычислительной математики и математического моделирования, а также проведенной валидацией и верификацией разработанных методов.

Личный вклад соискателя. Соискателем самостоятельно построена представленная в работе физико-математическая модель, исследован ряд ее свойств, построены вычислительные алгоритмы, создан параллельный программный комплекс для численного исследования термомеханических процессов в многофазных средах, получены численные результаты для ряда верификационных и валидационных расчетов.

В ходе защиты диссертации вопросы соискателю задали члены диссертационного совета: д.ф.-м.н. Головизнин В.М., д.ф.-м.н. Тишкин В.Ф., д.ф.-м.н. Орлов Ю.Н., д.ф.-м.н. Меньшов И.С., д.ф.-м.н. Четверушкин Б.Н., д.ф.-м.н. Змитренко Н.В.

В частности, член совета Головизнин В.М. поинтересовался, есть ли реальные прикладные задачи, для решения которых нужны разработанные соискателем технологии. Соискатель ответил, что одним из таких прикладных направлений является моделирование процесса перехода дефлаграции в детонацию, а также традиционные задачи динамики многофазных сред и различные многофазные течения.

Головизнин В.М. попросил уточнить, какие смеси рассматриваются, газовые или гетерогенные. Соискатель ответил, что модель позволяет описывать поведение гетерогенных смесей.

Член совета Тишкин В. Ф. спросил, обеспечивают ли лимитеры, используемые в работе, выполнение энтропийного неравенства. Соискатель ответил, что проверки лимитеров на энтропийную корректность не проводил,

однако, ожидает, что для усредненных величин энтропийное неравенство должно быть выполнено.

Тишкин В.Ф. дал комментарий на ответ соискателя, в котором указал, что для случая решений с нулевым порядком это верно, однако, в других случаях утверждение подлежит проверке, с чем соискатель согласился.

Член совета Орлов Ю.Н. уточнил, предполагается ли сферическая симметрия в постановке трехмерной задачи, представленной в работе, или же решается полная трехмерная задача. Соискатель указал, что решается полная трехмерная задача.

Орлов Ю.Н. попросил уточнить, каким образом оценивалось согласие полученных результатов в ходе вычислительных экспериментов с представленными экспериментальными данными. Соискатель ответил, что ошибка проверялась в норме L_2 , однако в текст работы полученные результаты не вошли.

Член совета Тишкин В.Ф. спросил, выполнено ли для предложенной соискателем модели условие постоянства дисторсии при движении тела как твердого. Соискатель ответил, что выполнено, сославшись на свою работу, в которой этот вопрос был исследован.

Также Тишкин В. Ф. спросил, есть ли в однофазном случае в этой модели указанное выше свойство. Соискатель в ответ сказал, что в этом случае представленная модель полностью переходит в модель Годунова-Роменского, для которой все необходимые свойства доказаны.

Член совета Змитренко Н. В. попросил уточнить, что соискатель называет возмущенной медью, на что соискатель ответил, что это сжатая медь, имеющая то же уравнение состояния, что обычная, но другие параметры уравнения состояния.

Существенных замечаний по диссертации во время обсуждения высказано не было.

С положительной оценкой диссертации выступили д.ф.-м.н. Меньшов И.С. и академик РАН д.ф.-м.н. Четверушкин Б.Н.

На заседании 16 ноября 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Алексееву М. В. ученую степень кандидата физико-математических наук за разработку новых средств математического моделирования динамических процессов в многофазных средах с прямым разрешением межфазных границ в рамках чисто эйлера подхода, вносящих существенный вклад в развитие методов математического моделирования термомеханических и гидродинамических процессов в многофазных средах.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 16, против - 1, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель

диссертационного совета 24.1.237.01

д.ф.-м.н., академик РАН, профессор

Четверушкин Б.Н.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.237.01

к.ф.-м.н.

Корнилина М.А.

16 ноября 2023 года.

