

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 26 декабря 2023 № 15

О присуждении **Немцеву Максиму Юрьевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование процессов горения пористых энергетических материалов в широком диапазоне объемной доли» по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 29.08.23 (протокол заседания №15/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 России №105/нк от 11 апреля 2012 года. На своем заседании 26 октября 2023 г. диссертационный совет принял решение о переносе даты защиты на 26.12.2023 г. в связи со служебной необходимостью.

Соискатель **Немцев Максим Юрьевич**, 1991 года рождения, в 2015 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» с присвоением

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

С 2018 г. по 2022 г. соискатель освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в очной аспирантуре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по направлению подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника».

В настоящее время соискатель работает в должности научного сотрудника в Федеральном государственном учреждении «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук».

Диссертация выполнена в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в период обучения в аспирантуре.

Научный руководитель – Меньшов Игорь Станиславович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник 8 отдела ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Официальные оппоненты:

Русяк Иван Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информационные технологии» ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Гидаспов Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры 806 ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» дали **положительный** отзыв на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «**Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук**» в своем **положительном** отзыве, подписанном **Крупкиным Владимиром Герцовичем**, доктором физико-математических наук, заместителем руководителя отдела горения и взрыва ФИЦ ХФ РАН, и утвержденным

Чертовичем Александром Викторовичем, доктором физико-математических наук, и.о. директора ФИЦ ХФ РАН, указала, что работа выполнена на достаточно высоком научном уровне. Тема работы актуальна и соответствует специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. В работе получены новые результаты, касающиеся численного моделирования двухфазных многокомпонентных течений с учетом процессов прогрева и пиролиза элементов твердой фазы, которые могут быть применены для решения задач, представляющих научную и практическую ценность. Разработанная математическая модель может использоваться в научной работе в ЦНИИ «Буревестник» и других научных организациях, а также в практической работе специалистами, занятыми исследованиями по совершенствованию внутренней баллистики ствольных систем. Результаты работы свидетельствуют о способности диссертанта решать сложные задачи вычислительной математики в области динамики двухфазных течений. Диссертационная работа Немцева М.Ю. полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, а ее автор, Немцев Максим Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соискатель имеет 5 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 4 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК, 3 – в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

1. *Menshov I. S., Nemtsev M. Y., Semenov I. V.* Numerical Modeling of Wave Processes Accompanying Combustion of Inhomogeneously Distributed Composite Propellant //Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2019. – Т. 59. – №. 9. – С. 1528-1541. (**Scopus, WOS**)

2. Семенов И. В., Меньшов И. С., Немцев М. Ю. Математическое моделирование осесимметричных внутрибаллистических процессов //Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. – 2017. – №. 143. – С. 143-20. **(ВАК)**
3. Немцев М. Ю. и др. Моделирование фильтрации и конвективного горения в блочных зарядах зерен порошка, ингибированных поливинилбутиралем в постоянном объеме //Nonequilibrium processes. – 2019. – С. 352-363. **(РИНЦ)**
4. Немцев М. Ю., Меньшов И. С., Семенов И. В. Численное моделирование динамических процессов в среде мелкодисперсных твердых частиц //Математическое моделирование. – 2022. – Т. 34. – №. 8. – С. 73-96. **(Scopus)**
5. Немцев М. Ю. Численное моделирование динамики двухфазной смеси газа и твердых дисперсных частиц//Математическое моделирование. – 2023. – Т. 35. – №. 7. – С. 97-117. **(Scopus)**

Личный вклад соискателя в работах [1, 2] заключается в получении результатов численного моделирования серии задач течения двухфазной реагирующей смеси, проверки замыкающих соотношений и сравнении результатов расчетов с экспериментальными данными. В работе [3] представлены полученные соискателем результаты разработки модели воспламенения и горения энергетического материала высокой плотности с пленочным покрытием с учетом неравновесности, многокомпонентного состава, кинетики пиролиза пленки и прогрева, ее программной реализации и валидации на задаче о горении энергетического материала в замкнутом объеме. В работе [4] для системы уравнений движения твердых частиц, возникающей при континуальном описании двухфазных дисперсных сред, соискателем построен численный метод Годуновского типа на основе точного и приближенного решения задачи Римана типа HLL. Тестирование реализованных методов проведено на серии задач, являющихся аналогами известных газодинамических тестов. В работе [5] автором предложен метод

регуляризации модели течения двухфазной смеси газа и твердых частиц. Метод регуляризации основывается на расщеплении исходной системы на две подсистемы, каждая из которых является строго гиперболической и имеет консервативный вид. Автором разработаны и программно реализованы разностные схемы гудуновского типа для численного решения этих подсистем и проведено их тестирование.

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

На диссертацию поступили отзывы ведущей организации и оппонентов, также поступили 3 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. В отзывах содержится ряд замечаний:

В отзыве ведущей организации ФГБУН ФИЦ ХФ им. Н.Н.Семенова РАН:

1. Какие математические модели имеются в научной литературе для рассматриваемого процесса воспламенения и горения блочных зарядов?
2. В работе рассматривается регуляризация определяющей системы уравнений на дискретном уровне путем расщепления. Вносит ли данный подход какие-либо негативные последствия?
3. В работе используется явная схема интегрирования по времени. При этом для увеличения шага интегрирования было бы целесообразно применить неявные методы.
4. На стр. 26 формулами (2.2.4) и (2.2.5) записаны модифицированные уравнения для коэффициента сопротивления в среде с низкой пористостью. Автор не использует литературные данные по коэффициенту сопротивления, которые были получены экспериментально в [6] на прессованных образцах из свинцовых шариков, а выводит свои формулы, используя данные по фильтрации азота в блочных пороховых образцах. В диссертации нет информации о том, как были получены эти данные и эти формулы.

5. В Главе 4 приводятся только одномерные распределения параметров вдоль образца и сопоставления с показаниями датчиков давления, полученными в экспериментах. Однако были ли обнаружены в расчетах какие-либо значимые многомерные эффекты?

В отзыве официального оппонента, д.ф.-м.н. Русяка И.Г.:

1. На стр. 24 диссертации представлена зависимость (1.1.9) для межгранулярного давления, которая содержит 3 эмпирические константы. Непонятно, кем, как и где они определяются и чему равны их значения? В работе этой информации, к сожалению, нет.
2. В параграфе 1.4, где описана модель воспламенения пленки, граничные условия в задаче (1.4.1) записаны неверно. По крайней мере, при той системе координат, которую выбрал автор, когда координата y отсчитывается из глубины порохового элемента, граничное условие на поверхности должно записываться со знаком «+». При этом сама тепловая задача должна учитывать разрывность теплофизических коэффициентов пленки и материала пороха.
3. Физико-математические и численные постановки задач течения гетерогенной реагирующей среды (см. (1.1.5)), стр 22 и (2.1.3), стр. 34 не содержат начальных и граничных условий. Без этого соответствующие постановки задач не являются полными. Не ясно, в этой связи, где и какие граничные условия выставляются и как они реализуются в вычислительной модели? Для гиперболических систем уравнений это имеет важное значение. Не ясно также, с какого момента начинается решение задачи и как задаются параметры в начальный момент времени? Здесь тоже есть проблемы, которые требуют обсуждения.
4. В работе отсутствует анализ расчетных данных по скоростям движения фаз. Почему это важно? Экспериментальная установка и, соответственно расчетная область в работе состоят из двух соосных каналов разных диаметров, заканчивающихся отверстием истечения. В этих условиях твердая фаза должна «мигрировать» из основного канала, где она

воспламеняется и горит, в дожигательную секцию, а затем, возможно, и покидать установку через отверстие истечения. Судя по представленным результатам, процессы в дожигательной секции моделируются. К сожалению, вычислительные детали, связанные с этими процессами, в работе не обсуждаются.

5. Все численные результаты, приведенные в работе, получены в одномерном приближении. Тогда какой смысл приводить в работе пространственную постановку задачи? С другой стороны, характер втекания и истечения двухфазной двухскоростной среды в дожигательную камеру явно носит двумерный осесимметричный характер, что предполагает реализацию пространственной модели.
6. Библиографический список, представленный в рецензируемой работе, во-первых, необычайно мал, во-вторых, в недостаточной степени отражает степень научной разработанности темы диссертации. Неоправданно много внимания уделяется формальному упоминанию классических работ по баллистике, не имеющих отношения ни к газовой динамике, ни к механике гетерогенных реагирующих сред, чему посвящена работа, в то же время работам, имеющим к этому прямое отношение, внимания практически не уделяется. А там автор нашел бы для себя очень много полезной информации, с точки зрения разработанности темы. В этой связи можно было бы порекомендовать, например, монографии: Русяк И.Г., Ушаков В. М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. Екатеринбург: УрО РАН. 2001. – 259 с., и Русяк И.Г., Липанов А.М., Ушаков В.М. Физические основы и газовая динамика горения порохов в артиллерийских системах. -М. -Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016. – 456 с., где представлена помимо всего прочего и обширная библиография по исследуемой теме.

В отзыве официального оппонента, д.ф.-м.н. Гидаснова В.Ю.:

1. Используемые в работе газообразные продукты сгорания и воздух описываются брутто-веществами (продукты сгорания энергетического

материала, полимерной пленки, дымного пороха, бензотрифуроксана), которые характеризуются набором констант, входящих в термическое и калорическое уравнения состояния, цифровые значения констант не приводятся. Также имеются неточности в выражениях (2.1.4), описывающих термодинамические свойства продуктов сгорания. Значения (и способ определения) тепловых составляющих энергий, выделяющихся при горении и входящих в правые части системы уравнений в частных производных (2.1.5) - (2.1.8), не приводятся.

2. Отсутствует описание расчетных сеток, используемых при моделировании экспериментов в главах 3 и 4 в двумерной нестационарной постановке. Соответственно отсутствует проверка сходимости результатов вычислений при измельчении расчетной сетки.
3. В работе представлена крайне скудная визуализация параметров многофазного течения, полученных в двумерной нестационарной постановке. Присутствуют только зависимости параметров течения вдоль оси установки и в точках размещения численных датчиков.

В отзыве на автореферат от д.ф.-м.н., профессора **Кочеткова Анатолия Васильевича**, заведующего кафедрой динамики многокомпонентных сред НИИ Механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского и к.ф.-м.н., с.н.с. (звание) **Абузярова Мустафы Хасьяновича**, в.н.с. НИИ Механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского в качестве замечаний указано:

1. Что подразумевается под приближенным решением задачи Римана типа HLL?
2. Из текста автореферата неясно, решались ли задачи в наиболее полной трехмерной постановке.

В отзыве на автореферат от к.ф.-м.н., доцента **Уткина Павла Сергеевича**, профессора школы Астронавтики Харбинского политехнического института (Китай), содержатся следующие замечания:

1. Автор пишет (стр. 8 диссертации), что одним из недостатков моделей, основанных на системе уравнений Баера-Нунциато, является то, что, как

правило, уравнение состояния вещества для фазы частиц не является реальным уравнением, а подбирается искусственным образом. Стоит отметить, что хотя, действительно, часто так и делается, это не является недостатком или принципиальным ограничением моделей Баера-Нунциато. Это, скорее, технический прием в задачах, когда реальная сжимаемость ничтожна, и в расчетах достаточно обеспечить сам этот факт для корректного воспроизведения волновой динамики процесса. При этом, в задачах, где количественные характеристики сжимаемости фазы частиц важны, в моделях Баера-Нунциато возможно использовать реалистичное уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена для каждой из фаз.

2. На стр. 9 диссертации написано, что в работах [22 – 24] существенно предположение о сжимаемости обеих фаз. Однако, это не так. В работе [22] частицы дисперсной фазы являются несжимаемыми, как и у автора. Модель [22] основывается на молекулярной теории гранулированных сред [20]. В этом смысле, очень интересно было бы увидеть результаты расчетов тестовых постановок из [22] по модели автора.
3. В начале раздела 2.1 диссертации автор выписывает базовую систему уравнений со ссылками на [6] и [15]. Ссылки [6] и [15] – это объемные книги, в которых обсуждается множество различных моделей. Очень не хватает пояснений, какие именно уравнения в данных книгах были отправными точками для дальнейших исследований авторов.
4. Автор уделяет большое внимание построению решения задачи Римана для сформулированной им системы уравнений в частных производных. Это одно из центральных мест работы. На основании построенного решения был предложен «римановский решатель» для моделирования течений двухфазных сред, вероятно, «в широком диапазоне объемной доли», как следует из названия диссертации. Однако, в диссертации практически нет содержательных результатов, непосредственно связанных с описанием динамики волновых процессов в двухфазных средах. Мне кажется, результаты теста о разлете сжатого слоя частиц в вакуум, понятие волны

«раскомпактирования» (по-моему, введенное в работах автора; я не встречал подобного термина ранее), результаты теста о распространении волны компактирования по неоднородно распределенным частицам – все это нуждается в интерпретации с точки зрения известных и устоявшихся понятий волновой динамики двухфазных сред, которые формировались на основе имеющихся экспериментальных данных и расчетных данных по другим моделям. Результаты решения тестов в Главе 3 сравниваются, в лучшем случае, с точным решением рассматриваемой системы уравнений. В разделах 3.1, 3.2, вообще ни с чем не сравниваются. Это не дает представления о том, какие наблюдающиеся в реальности особенности волновых процессов в двухфазных средах воспроизводятся или не воспроизводятся в модели автора, и как следствие, затрудняет оценку области применимости модели автора.

5. То же относится и к результатам в Главе 4. Автор сам указывает, что распространение волны конвективного горения и волны компактирования по пороховому заряду в рассматриваемой задаче заметной роли не играют. Кривые давления в области заряда подобны друг другу и, по сути, мне кажется, слабо отличаются от некоторой средней кривой, которую бы дала термодинамическая модель процесса. С этой точки зрения, задача в Главе 4 представляется мне не самым удачным примером применения модели двухфазной среды, предложенной автором.

Отзыв на автореферат от к.т.н., доцента (звание) **Емельянова Валентина Юрьевича**, доцента кафедры «Систем управления и компьютерных технологий» ФГОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» содержит следующие замечания:

1. Следует порекомендовать автору большей аккуратности в ключевых формулировках. Так в третьем пункте положений, выносимых на защиту, заявлены численные методы решения рассматриваемой системы уравнений. Судя по описанию результатов второй главы диссертации,

речь скорее следует вести о совокупности расчетных процедур, основанных на одном методе, принятом в качестве базового, что также можно рассматривать в качестве полноценного результата диссертационного исследования.

2. Новизну и оригинальность предложенного программного комплекса или его модулей принято подтверждать свидетельствами Роспатента о регистрации программ для ЭВМ, сведения о которых в автореферате отсутствуют.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью и высоким уровнем компетентности по всем основным вопросам, рассмотренным в диссертации, включая численное изучение процессов в многофазных средах, внутреннюю баллистику, разработку и анализ новых вычислительных алгоритмов, реализации их в виде программного комплекса, применение методов и средств математического моделирования для решения сложных научно-практических задач, что подтверждается списком публикаций официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **Разработана** физико-математическая модель горения пористого энергетического материала, состоящего из пороховых зерен, покрытых полимерной пленкой и спрессованных до высокой объемной доли, с учетом неравновесности, многокомпонентного состава, кинетики пиролиза пленки и прогрева.
2. **Проведена** регуляризация базовой неэволюционной модели динамики двухфазной дисперсной смеси газа с твердыми частицами.
3. **Построены** численные методы решения регуляризованной системы уравнений течения двухфазной смеси газа с твердыми частицами годуновского типа на основе приближенных римановских решателей

типа HLL.

4. **Проведена** алгоритмическая и программная реализация предложенной дискретной модели и методов в рамках программного комплекса для моделирования двухфазных течений газа с твердыми частицами на ЭВМ. **Проведена** верификация и валидация разработанной вычислительной методики и ее программной реализации с использованием набора тестов.
5. **Выполнено** моделирование процесса воспламенения и конвективного горения образцов энергетического материала в экспериментальной установке с дожигательной секцией с использованием разработанной вычислительной методики. Проведен сравнительный анализ, показавший качественное и количественное согласие экспериментальных и расчетных данных.

Теоретическая значимость исследования состоит в формулировке новой математической модели воспламенения и конвективного горения пористого энергетического материала, покрытого полимерной пленкой; регуляризации на дискретном уровне модели двухфазной смеси газа с твердыми частицами и построении численного метода годуновского типа для полученных систем.

Практическое значение результатов исследования заключается в программной реализации предложенных моделей, позволившей получить согласующиеся с имеющимися экспериментальными данными результаты расчетов процесса конвективного горения в установке с дожигательной камерой. Предложенные численные методы могут быть использованы для исследования и оптимизации свойств энергетического материала с пленочным покрытием в широком диапазоне объемной доли.

Достоверность результатов, полученных с использованием предложенной модели, обеспечивается валидацией и тестированием модели и ее элементов на серии задач; сравнением полученных численных результатов с имеющимися аналитическими решениями и согласием

результатов вычислительных экспериментов с данными физических экспериментов для физико-химических процессов в замкнутом объеме и в лабораторной установке с дожигательной секцией.

Личный вклад соискателя. Автором самостоятельно проведена разработка моделей, алгоритмов и программных модулей для реализации подходов к моделированию пористого энергетического материала (ЭМ) с пленочным покрытием в случае многокомпонентных фаз. Реализован алгоритм взаимодействия зерна ЭМ и пленки, учитывающий стадии воспламенения, пиролиза, охвата зерна горением и их длительность. Проведена регуляризация на дискретном уровне модели Р.И.Нигматулина, описывающей динамику твердых недеформируемых частиц в газе. Автором построен и реализован в виде программного модуля численный метод для полученных в результате регуляризации систем. Все численные исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично автором в процессе научной деятельности. Материалы из совместных публикаций, использованные в диссертационной работе, содержат оригинальные результаты автора.

В ходе защиты диссертации вопросы соискателю задали члены диссертационного совета: В.Ф. Тишкин, В.М. Головизнин, Н.В. Змитренко, В.И. Мажукин, Ю.Н. Орлов, М.В. Якобовский.

Существенных замечаний по диссертации высказано не было. Соискатель ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы, согласился с рядом замечаний, указанных в письменных отзывах, и дал комментарии в необходимых случаях.

В дискуссии приняли участие члены совета: В.Ф. Тишкин, В.М. Головизнин.

На заседании 26 декабря 2023 года диссертационный совет принял решение за разработку физико-математической модели процесса воспламенения и конвективного горения энергетического материала высокой плотности с пленочным покрытием, вносящей существенный вклад в

развитие математического моделирования физико-химических процессов внутренней баллистики, присудить Немцеву Максиму Юрьевичу ученую степень кандидата-физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 15, против – нет, недействительных бюллетеней – 1.

Заместитель председателя
диссертационного совета 24.1.237.01



Якововский М.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.237.01



Корнилина М. А.

26.12.2023 г.