



УТВЕРЖДАЮ:

директор ИМП им.М.В. Келдыша РАН  
чл.-корр., д.ф.-м.н. Аптекарев А.И.

2023 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук".

Диссертация «Численное моделирование процессов горения пористых энергетических материалов в широком диапазоне объемной доли» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Немцев Максим Юрьевич с 2018 по 2022 обучался в очной аспирантуре Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук по направлению подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная техника. В настоящее время работает в Федеральном государственном учреждении "Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук" в должности научного сотрудника.

В 2015 г. окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. В 2022 г. закончил очную аспирантуру ИППМ им. М.В. Келдыша РАН по направлению подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная техника.

Удостоверение/справка о сдаче кандидатских экзаменов выдано(а) в 2023 г. в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, Меньшов Игорь Станиславович работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в должности главного научного сотрудника.

По итогам обсуждения диссертации «Численное моделирование процессов горения пористых энергетических материалов в широком диапазоне объемной доли» **принято следующее заключение:**

**Тема диссертации является актуальной**, поскольку работа посвящена разработке численной модели, алгоритмов и программных кодов для решения задач механики многофазных сред, имеющих теоретическое и прикладное значение. Она содержит новые результаты в области математического моделирования сложных физико-химических процессов в двухфазных средах. Автором предложена новая физико-математическая модель для описания процессов конвективного горения ингибированного энергетического материала высокой плотности, учитывающая многокомпонентный состав фаз, а также разработаны вычислительные алгоритмы и программная реализация, которая может быть использована для решения конкретных прикладных задач.

**Целью** настоящей работы ставится создание физико-математической модели, вычислительного алгоритма и программных модулей для моделирования процессов в

высокоплотном энергетическом материале конвективного горения, состоящего из зерен, покрытых полимерной пленкой в двухфазном эйлеровом приближении.

В качестве полимерного покрытия используется пленка поливинилбутираля, реализующая механизм управления горением энергетического материала в экспериментальных установках, анализ которых производится с применением разработанной вычислительной модели.

Для достижения цели работы решаются следующие **задачи**:

1. Разработка модели воспламенения и пиролиза полимерной пленки.
2. Регуляризация модели двухфазного течения Р.И.Нигматулина. Построение численного метода годуновского типа для регуляризованной модели.
3. Разработка вычислительных алгоритмов и программных модулей для расчета конвективного горения энергетического материала, состоящего из зерен, покрытых полимерной пленкой и спрессованных до высокой объемной доли.
4. Проведение верификации и валидации работы реализованных вычислительных алгоритмов на решении модельных задач.
5. Численное исследование процесса горения высокоплотного энергетического материала в экспериментальной установке с дожигательной секцией.

#### **Основные результаты диссертации:**

1. Разработана численная модель воспламенения и горения высокоплотного энергетического материала, покрытого полимерной пленкой с учетом неравновесности, многокомпонентного состава, кинетики пиролиза и прогрева. Модель основана на многокомпонентной системе уравнений Р. И. Нигматулина. Для моделирования фазового перехода используется обобщение полуаналитической модели конвективного горения Б. С. Ермолаева. Воспламенение моделируется с применением решения уравнения теплопроводности. Пиролиз пленки моделируется на основе теплового потока, поступающего в пленку. Горение пористых энергетических материалов описывается геометрическим законом горения, учитывающим постепенный охват зерна горением.
2. Предложена регуляризация базовой модели динамики двухфазной дисперсной смеси газа с твердыми частицами. Построены численные методы годуновского типа для решения регуляризованной системы на основе приближенных римановских решателей типа HLL.
3. Разработанная модель реализована в виде вычислительных алгоритмов и программных модулей, которые были интегрированы в параллельный программный комплекс для моделирования пространственных течений двухфазной многокомпонентной смеси газа с твердыми частицами на многопроцессорных ЭВМ.
4. Проведена верификация и валидация работы как отдельных блоков модели, так и модели в целом путем численного решения тестовых задач и сравнения результатов с экспериментальными данными.
5. Выполнено моделирование процессов воспламенения и конвективного горения энергетического материала, состоящего из зерен, покрытых полимерной пленкой в установке со сбросом давления. Проведен сравнительный анализ результатов расчета с экспериментальными данными.

**Все результаты диссертации получены лично соискателем при научном руководстве** Меньшова Игоря Станиславовича.

**Научная новизна** работы включает комплекс решений (математических, алгоритмических и программных), а также результаты расчетов, обеспечивающих достижение цели работы.

Созданная модель применима для прикладных научных исследований и позволяет проводить оптимизацию свойств энергетического материала. В отличие от существующих моделей двухфазных систем газа с твердыми частицами предложенная в диссертации вычислительная модель

1. учитывает наличие полимерной пленки на поверхности частиц, оказывающей существенное влияние на процесс воспламенения и горения энергетического материала.
2. учитывает многокомпонентный состав фаз, что позволяет более точно определять термодинамические параметры смеси в зависимости от ее локального состава и проводить исследования в широком диапазоне объемной доли частиц.

Проведена регуляризация на дискретном уровне исходной неэволюционной системы уравнений движения газа с твердыми частицами, приводящая к гиперболическим системам уравнений. Разработанные для их решения численные методы годуновского типа на основе римановских решателей типа HLL учитывают возможность образования областей без частиц.

**Научная и практическая ценность работы** заключается в том, что описание и моделирование процессов горения энергетических материалов представляет как фундаментальный, так и прикладной интерес. Задача моделирования процессов конвективного горения энергетических материалов в широком диапазоне пористости при наличии полимерного покрытия не решена до конца. Представленная в работе модель и ее программная реализация позволяют получить современный инструмент для проведения прикладных вычислительных исследований в области процессов конвективного горения энергетических материалов и оптимизации их свойств.

**Достоверность результатов**, получаемых с использованием разработанной в рамках диссертационной работы модели, обеспечивается результатами моделирования на ЭВМ модельных тестовых задач и сопоставлением полученных решений с точными аналитическими и экспериментальными данными.

**Материалы диссертации** полно представлены в работах, опубликованных соискателем.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных журналах:

1. 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. [BAK]
2. Menshov I. S., Nemtsev M. Y., Semenov I. V. Numerical Modeling of Wave Processes Accompanying Combustion of Inhomogeneously Distributed Composite Propellant. Comput. Math. and Math. Phys. 59, 1528–1541 (2019). [WOS]
3. 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, BAK]
4. Немцев М. Ю. Численное моделирование динамики двухфазной смеси газа и твердых дисперсных частиц //Математическое моделирование. – 2023. – Т. 35. – №. 7. – С. 97-117. [SCOPUS, BAK]
5. 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]

**Личный вклад соискателя** заключается в том, что все численные исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично автором в процессе его научной деятельности. Материалы из совместных публикаций, использованные в работе, содержат оригинальные результаты автора. Также лично автором была проведена разработка моделей, численных методов и программных модулей для реализации моделирования пористого энергетического материала с пленочным покрытием в двухфазном эйлеровом приближении с учетом многокомпонентности фаз, проведена регуляризация на дискретном уровне модели Р.И.Нигматулина и построены численные методы годуновского типа для полученных в

результате регуляризации систем. Автором был реализован ряд программных модулей, значительно расширяющих функционал программного комплекса расчета пространственных течений двухфазной смеси невязкого сжимаемого газа с твердыми частицами.

**Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.2 (05.13.18) - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, в частности, пунктам:**

- п. 1 - разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;
- п. 5 - комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.
- п. 7 - разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели.
- п. 8 - разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

На основании полученного в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН экспертного заключения диссертация Немцева М. Ю. не содержит информации ограниченного доступа и может быть опубликована в открытой печати.

Диссертация «Численное моделирование процессов горения пористых энергетических материалов в широком диапазоне объемной доли» Немцева Максима Юрьевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 (05.13.18) математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на расширенном заседании научного семинара 15-го отдела ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Присутствовало на заседании 15 чел.

Выступили с положительной оценкой диссертации: Тишкин В.Ф., Кулешов А.А., Аристова Е.Н., Змитренко Н.В.

Результаты голосования: "за" - 15 чел., "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел., протокол №4 от "8" "06" 2023 г.



Тишкин Владимир Федорович  
член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. отд. №15



Кулешов Андрей Александрович  
д.ф.-м.н., г.н.с. отд. №15