

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора, академика РАН
Русяка Ивана Григорьевича на диссертационную работу
**«Численное моделирование процессов горения пористых энергетических
материалов в широком диапазоне объемной доли»,**
представленную **Немцевым Максимом Юрьевичем,**
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диссертация посвящена разработке и реализации методики численного расчета процессов горения и течения многокомпонентных гетерогенных реагирующих сред в условиях, приближенных к артиллерийскому выстрелу. Важной особенностью рассмотренной в работе задачи является детализация физико-математической модели срабатывания высокоплотных зарядов конвективного горения, направленная на реализацию идеи управления газообразованием в заснарядном пространстве. Эта идея постоянно находится в фокусе внимания баллистиков, как один из способов повышения скорости метаемого тела при выходе из ствола или снижения максимального давления при заданной скорости метания за счет повышения прогрессивности горения энергетического материала. Полученные результаты представляют собой новые математические модели, численные алгоритмы и программный продукт, обеспечивающие расчет нестационарных параметров внутрикамерных процессов для высокоплотных зарядов конвективного горения. В этой связи, работа, несомненно, является актуальной.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 90 страницах текста, включает 22 рисунка и 7 таблиц. Список литературы включает 60 наименований.

Первая глава посвящена построению нестационарной пространственной физико-математической модели постепенного воспламенения и горения пористого энергетического материала покрытого пленочным ингибитором, находящегося в начальный момент в условиях высокой плотности. За основу принята модель течения гетерогенной реагирующей среды Р.И. Нигматулина в приближении взаимопроникающих континуумов. Для моделирования межфазного взаимодействия рассмотрены эмпирические аппроксимации коэффициентов сопротивления и теплообмена в двухфазной гетерогенной системе. Процесс горения описывается полуэмпирической моделью и разделяется на последовательность стадий. Для каждой стадии указаны условия ее начала и завершения. Описание газоприхода отдельного порохового зерна производится на основе геометрического закона горения порохов с учетом

постепенного вовлечения элементов заряда в процесс горения.

Во второй главе приведено описание численного метода интегрирования полученной системы уравнений. Предложен метод регуляризации математической модели, который основывается на расщеплении исходной системы на две подсистемы, описывающие соответственно динамику фаз и межфазное взаимодействие. Показано, что каждая из полученных систем является гиперболической и они могут быть записаны в консервативном виде, что позволяет построить для них численные алгоритмы на основе метода С.К. Годунова.

Третья глава посвящена верификации и валидации численного метода решения системы уравнений движения двухфазной гетерогенной смеси, а также модели процесса взаимодействия зерна и пленки при прогреве, воспламенении и горении. Рассматриваются одномерные задачи, являющиеся аналогами известных газодинамических тестов. Численные решения, полученные с помощью метода С.К. Годунова с использованием приближенного решения задачи Римана, сравниваются с точными аналитическими решениями и экспериментальными данными. Проводится верификация и валидация механизма горения энергетического материала с пленочным покрытием и без него. Экспериментальные зависимости давления внутри объема от времени сравниваются с расчетными данными. Показано, что результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными по форме и максимальному темпу роста давления как для заряда, состоящего из зерен, покрытых пленкой поливинилбутираля, так и для зерен без покрытия пленкой полимера.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования горения высокоплотных зарядов конвективного горения с пленочным покрытием различных плотностей. Для образца, имеющего среднюю среди рассмотренных плотность заряжения, приведены результаты численных расчетов при варьировании параметров модели, определяющих длительность стадии пиролиза пленочного ингибитора на поверхности зерен и в процессе охвата зерна горением. Результаты расчетов сравниваются с полученными в эксперименте записями показаний датчиков давления в экспериментальной установке. Проведены расчеты горения образцов трех различных плотностей из семиканальных зерен, ингибированных пленкой полимера. На основе проведенных вычислительных экспериментов удалось определить расчетные времена и давления при смене характерных стадий пиролиза.

ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ И ВЫВОДОВ

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается обоснованием применяемых допущений, корректным использованием апробированного математического аппарата механики сплошной среды в рамках модели Р.И. Нигматулина и апробированного метода численного моделирования на основе схемы С.К. Годунова, а также верификацией моделей по сеточной сходимости и путем сравнения с результатами решения тестовых задач и результатами лабораторных исследований. Результаты диссертации

опубликованы в ведущих изданиях, индексируемых в российских и международных базах цитирования, а также прошли обсуждение на международных и всероссийских научно-технических конференциях. В связи с этим, научные положения и выводы работы являются **обоснованными**.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ИХ НАУЧНАЯ НОВИЗНА

1. Сформулирована по совокупности факторов новая пространственная нестационарная физико-математическая и вычислительная модель внутрикамерных процессов с высокоплотными зарядами конвективного горения, состоящими из пороховых элементов, покрытых полимерной пленкой, с учетом их постепенного прогрева, воспламенения, последующего горения и движения гадопороховой смеси в приближении взаимопроникающих континуумов.

2. На основе разработанной модели, реализованной в виде вычислительных алгоритмов, получены новые данные и новые знания о закономерностях воспламенения и горения высокоплотных зарядов конвективного горения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Теоретическая значимость работы состоит в развитии подходов к расчету параметров внутрикамерных процессов для высокоплотных зарядов конвективного горения при переходе от воспламенения к горению и движению пороховых элементов, покрытых полимерной пленкой.

Практическая значимость работы состоит в создании объектно-ориентированного программного обеспечения, позволяющего проводить исследование горения образцов в широком диапазоне объемных долей. Применение математического моделирования позволяет получить детали сложного для наблюдения и потенциально опасного быстротекущего процесса горения энергетического материала, а также планировать и масштабировать результаты лабораторных исследований.

Оценивая представленный материал в целом, можно констатировать, что диссертация написана математически грамотным языком. Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в работе, в достаточной степени обоснованы. Автореферат соответствует диссертации. Публикации автора отражают содержание проведенных исследований. Работа прошла необходимую апробацию на семинарах и научно-технических конференциях различного уровня. Результаты исследований поддержаны грантом РФФИ.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ

В качестве **недостатков** работы можно отметить следующие:

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, закачивающихся 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Не смотря на отмеченные недостатки, представленная на оппонирование диссертация, является законченной актуальной квалификационной работой, выполнена на высоком уровне, содержит решение важной научной задачи построения методики расчета внутрикамерных процессов с высокоплотными зарядами конвективного горения, элементы которых покрыты полимерной пленкой, задерживающей процесс их воспламенения. Работа имеет научную и практическую ценность для теории и практики отработки зарядов с повышенной прогрессивностью горения.

Диссертационная работа «Численное моделирование процессов горения пористых энергетических материалов в широком диапазоне объемной доли» соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Немцев Максим Юрьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Зав. кафедрой “Прикладная математика
и информационные технологии”
ФГБОУ ВО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова
Доктор технических наук по специальности
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы,
профессор, академик РАН

Русяк Иван Григорьевич

“ 30 ” ноября 2023 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования “Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова”

Адрес: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

Тел.: +7 (3412) 77-60-55 (доб. 6139); e-mail: info@istu.ru; primat@istu.ru

Подпись И.Г. Русяка удостоверено,

Ученый секретарь

Ученого совета Университета



Н.С. Сивцев