



УТВЕРЖДАЮ

И.О. Директора ФИЦ ХФ РАН

д.ф.-м.н.,

 А. В. Чертович

«4» декабря 2023

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Федеральный исследовательский центр Химической физики

им. Н.Н. Семенова Российской академии наук

на диссертацию Немцева Максима Юрьевича «Численное моделирование процессов горения пористых энергетических материалов в широком диапазоне объемной доли», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы исследований

Диссертационная работа Немцева М.Ю. посвящена построению физико-математической модели, вычислительного алгоритма и программных модулей для моделирования процессов конвективного горения в энергетическом материале (ЭМ), состоящем из пороховых зерен, покрытых полимерной пленкой, в двухфазном эйлеровом приближении.

Развитие артиллерийских систем связано с перманентной потребностью повышения дульной скорости (скорости метаемого тела при выходе из ствола). Одним из способов достижения данной цели является увеличение плотности заряжания, то есть, массы заряда при заданном объеме зарядной камеры. За рубежом применение высокоплотных пороховых зарядов исследуется очень активно применительно к ствольным системам разного калибра. Однако, чтобы увеличение массы заряда не привело к росту максимального давления, необходимо одновременно с повышением

плотности заряда обеспечить рост прогрессивности горения ЭМ. Это может быть достигнуто за счет покрытия зерен, составляющих пороховой заряд, тонкой полимерной пленкой с дальнейшим прессованием зерен до высокой плотности в блочное изделие нужной формы.

Воспламенение и горение блочных зарядов при выстреле происходит гораздо более сложным образом по сравнению с классическими пороховыми зарядами насыпной плотности, захватывая значительную часть движения метаемого тела по стволу. Фактически, данный способ реализует идею управления горением энергетического материала. Подбор и оптимизация блочных ЭМ производятся эмпирическим путем, поэтому разработка математических моделей, вычислительных алгоритмов и их программная реализация являются необходимыми стадиями создания эффективного инструмента для более глубокого изучения процессов, происходящих при горении высокоплотных ЭМ.

На сегодняшний день актуальным является моделирование внутрибаллистического процесса в газодинамической постановке. В результате такого моделирования можно получить распределения всех параметров течения в заснарядном пространстве в интересующие моменты времени, а не только в местах расположения датчиков. Это особенно важно для выстрелов с блочными зарядами, воспламенение и начало горения которых происходит по сложному механизму. Полученные данные позволят получить детальную картину выстрела с использованием блочных ЭМ, в том числе в схемах выстрела с присоединенным зарядом, и значительно сократить объем стрельбовых испытаний при оптимизации заряда.

Теоретическая и практическая значимость работы

Для пористого энергетического материала, покрытого полимерной пленкой, построена модель, вычислительный метод и его программная реализация, позволяющая проводить исследование горения образцов в широком диапазоне объемных долей твердой фазы, от той, что соответствует начальной плотности блочного заряда, до полного сгорания пороховых зерен.

Результаты расчетов, полученные в работе, согласуются с имеющимися опытными данным по воспламенению и горению блочных зарядов в экспериментальной установке, снабженной набором из 4 пьезодатчиков давления. 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.

Научная новизна

Предложена математическая модель горения пористого энергетического материала, покрытого пленкой полимера. Модель учитывает много-компонентный состав газовой и дисперсной фаз, процессы воспламенения, пиролиза пленки и горения энергетического материала по неполной поверхности в широком диапазоне его объемной доли.

Проведена регуляризация на дискретном уровне неэволюционной модели движения двухфазной смеси газа с твердыми частицами (пороховыми зернами) и получена термодинамически согласованная гиперболическая модель. Для полученной модели построен численный метод типа Годунова, использующий приближенное решение задачи Римана типа HLL и учитывающий возможность образования областей без твердых частиц.

Предложенная математическая модель реализована в рамках программного комплекса для моделирования внутренней баллистики на многопроцессорных ЭВМ. С использованием разработанной модели проведено математическое моделирование воспламенения и горения блочных зарядов разной начальной плотности применительно к результатам соответствующих опытов. Достигнуто согласие расчетов с экспериментом и выявлены закономерности развития процесса на отдельных стадиях.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов

Достоверность результатов, полученных с помощью предложенной модели, обеспечивается тестированием отдельных блоков модели и модели в целом. Для тестирования использованы задачи, имеющие известное решение,

а также экспериментальные результаты по фильтрации газа в блочных зарядах и воспламенению и горению блочных зарядов в лабораторной установке.

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем работы составляет 90 страниц, включая 22 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 60 наименований.

Во *введении* обоснована актуальность выполненной научной работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, приведены научные результаты, выносимые на защиту, указана их научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена построению математической модели конвективного горения энергетического материала высокой плотности, покрытого пленочным ингибитором в приближении взаимопроникающих континуумов. Дано описание моделируемых процессов воспламенения и горения пороховых зерен, покрытых пленкой полимера, и блочного заряда в целом. Приведены параметры, которые входят в модель и позволяют рассчитать эти процессы.

Во *второй главе* представлен численный метод интегрирования системы уравнений, составляющих математическую модель горения блочного порохового заряда. В основу математической модели положена известная модель Р.И. Нигматулина для однокомпонентной двухфазной среды с недеформируемыми и несжимаемыми частицами. Предложен и реализован метод регуляризации математической модели, основанный на расщеплении исходной системы уравнений на две подсистемы, которые описывают соответственно динамику фаз и межфазное взаимодействие.

Третья глава посвящена верификации и тестированию численного метода решения базовой системы уравнений для отдельных блоков математической модели, включая движение двухфазной смеси и одной

конденсированной фазы без газа, а также модели процесса взаимодействия порохового зерна и покрывающей его пленки при горении. Рассматриваются одномерные задачи, являющиеся аналогами известных газодинамических тестов.

В *четвертой главе* приведены результаты численного моделирования воспламенения и горения энергетического материала с пленочным покрытием при различной начальной плотности (пористости) заряда, которые соответствуют экспериментальной постановке. Результаты расчетов сравниваются с полученными в эксперименте записями показаний 4 датчиков давления, установленных в экспериментальной установке вдоль длины заряда. Определены характерные времена и давления для отдельных стадий процессов распространения волны воспламенения по заряду и пиролиза пленки.

В *заключении* приводятся основные результаты диссертационной работы и выводы.

Вопросы и замечания по диссертационной работе:

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?

Заключение

Высказанные вопросы и замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Немцева М.Ю. и не затрагивают ее основных положений и выводов. Диссертация 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. Диссертация М.Ю. Немцева представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решена научная задача: построена и проверена в работе математическая модель, пригодная для рассмотрения процессов воспламенения и горения плотных энергетических материалов. Результаты работы свидетельствуют о способности диссертанта решать сложные задачи вычислительной математики в области динамики двухфазных течений.

Работа прошла апробацию на отечественных и международных конференциях, а ее наиболее значимые результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Автореферат диссертации отражает ее содержание и основные результаты.

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.

Отзыв обсужден и одобрен на расширенном семинаре отдела «Горения и взрыва» 24 ноября 2023 года.

гл.н.с. лаборатории 1313 ФИЦ ХФ РАН, д.ф.-м.н.


_____ Крупкин В.Г.

Подпись гл.н.с. д.ф.-м.н Крупкина В.Г. заверяю
Учёный секретарь ФИЦ ХФ РАН к.ф.-м.н.




_____ Ларичев М.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук»

Адрес: 119991, Москва, ул. Косыгина, 4.

Телефон: +7 499 137-29-51

Сайт организации: <https://www.chph.ras.ru>

e-mail: icp@chph.ras.ru