

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, доцента Радченко Павла Андреевича на диссертационную работу Помыкалова Евгения Валерьевича «Метод математического моделирования процесса образования горячих точек в энергетическом материале», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа посвящена исследованию механизмов инициирования энергетических материалов при низкоскоростных механических воздействиях. Энергетические материалы широко применяются в оборонной, горнодобывающей и космической отраслях, при этом обеспечение безопасности их обращения, хранения и эксплуатации требует глубокого понимания условий возникновения неконтролируемых экзотермических реакций.

Существует значительное число экспериментальных и теоретических работ, посвящённых исследованию поведения взрывчатых веществ подверженным высокоскоростным воздействиям (скорости более 100 м/с), однако область низкоскоростных воздействий (менее 30 м/с), характерная для реальных сценариев транспортировки, падений и случайных инцидентов, остаётся изученной недостаточно полно. Отсутствие единой общепринятой картины механизмов зажигания в указанном диапазоне скоростей, в частности исследования роли фрикционных процессов на контактной границе, создаёт серьёзные препятствия для научно обоснованного прогнозирования опасных ситуаций.

Таким образом, диссертационное исследование, направленное на разработку математического метода моделирования поведения энергетического материала при низкоскоростном ударе с учётом локального температурного разогрева в тонком слое на контактной границе, является актуальной задачей. Работа обладает как фундаментальной значимостью для развития теории образования горячих точек, так и практической ценностью для повышения безопасности при работе с энергетическими материалами.

2. Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка

литературы из 90 наименований и двух приложений. Общий объём работы составляет 170 страниц, включая 89 рисунков и 6 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показана степень её разработанности, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования. Описаны методология и методы, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены сведения о внедрении результатов, степени достоверности, о положениях, выносимых на защиту, апробации работы и публикациях автора.

В первой главе проведён анализ современных моделей образования горячих точек в энергетических материалах и выполнен обзор экспериментальных исследований. Показано, что при низкоскоростных воздействиях доминирующую роль играют фрикционные механизмы, при этом математические методы для их количественного описания практически отсутствуют.

Во второй главе описан разработанный математический метод моделирования поведения энергетического материала при низкоскоростном ударе. Предложена самосогласованная модель взаимодействия инертного ударника с материалом, учитывающая убыль кинетической энергии ударника за счёт работы силы трения и изменения внутренней энергии материала. Разработана математическая модель образования тонкого слоя в энергетическом материале с учётом перехода от сухого трения к вязкому при плавлении материала.

В третьей главе представлены численные методы и алгоритмы, реализующие предложенные математические модели. Описан численный метод расчёта упругопластических течений с введением неравновесных напряжений, обеспечивающий устойчивость решения. Автором разработан численный метод расчёта температур в тонком слое энергетического материала на контактной границе с ударником, основанный на аналитическом решении уравнения теплопроводности. Предложен алгоритм оптимизации на основе метода Нелдера–Мида для решения обратной задачи определения прочностных параметров материала по данным натуральных экспериментов.

В четвёртой главе описан разработанный программный комплекс, позволяющий проводить численное моделирование низкоскоростного удара с учётом локального разогрева энергетического материала. Проведена верификация модели на тестовой задаче и шести натуральных экспериментах. Выполнены численные исследования температурных полей на контактной границе, показавшие, что учёт силы трения обеспечивает существенно более высокий нагрев (до температуры плавления и выше) по сравнению с чисто

деформационным механизмом. Установлено, что необходимыми условиями воспламенения являются достижение температуры выше температуры плавления материала и адиабатичность процесса на контактной границе. Сформулированы рекомендации по снижению чувствительности энергетических материалов к низкоскоростным воздействиям.

В заключении подведены итоги работы, сформулированы основные результаты и выводы по всем поставленным задачам, отмечено достижение цели исследования, а также обозначены перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложениях приведены акт о внедрении результатов в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина» и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, выданное Федеральной службой по интеллектуальной собственности.

Выводы в работе обобщают полученные результаты и соответствуют поставленным во введении целям. Диссертационное исследование Е.В. Помыкалова является законченным и представляет решение актуальной задачи.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе, являются достаточно обоснованными и достоверными, что обеспечивается комплексным подходом, сочетающим теоретический анализ, математическое моделирование и верификацию по результатам натуральных экспериментов.

Во-первых, в основе разработанного математического метода лежат фундаментальные законы механики сплошной среды, дополненные моделью упругопластического течения и полуэмпирическими уравнениями состояния молекулярных кристаллов.

Во-вторых, предложенные численные методы и алгоритмы базируются на строгих математических подходах. Численный метод расчёта упругопластических течений использует полуаналитическое решение системы дифференциальных уравнений, что обеспечивает высокую устойчивость метода и точность расчета. Разработанный метод расчёта температур в тонком слое основан на аналитическом решении уравнения теплопроводности, что позволяет корректно описывать фрикционный нагрев без излишнего измельчения расчётной сетки. Обоснованно выбран алгоритм оптимизации для решения обратной задачи определения прочностных

параметров с учётом малой размерности задачи и отсутствия аналитического выражения для градиента целевой функции.

В-третьих, обоснованность научных положений подтверждается сопоставлением результатов численного моделирования с данными натуральных экспериментов, показавшим высокую сходимость расчётных и экспериментальных значений глубины внедрения сферического ударника. Это свидетельствует о высокой степени адекватности разработанной модели.

В-четвёртых, сформулированные в работе рекомендации по снижению чувствительности энергетических материалов к низкоскоростным воздействиям логически вытекают из полученных результатов и не противоречат известным теоретическим представлениям.

Таким образом, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы является высокой, что позволяет рекомендовать полученные результаты для использования в научных и прикладных разработках в области безопасности обращения с энергетическими материалами.

4. Научная новизна и достоверность положений

Диссертационная работа содержит ряд новых научных результатов, обладающих новизной в области математического моделирования процессов инициирования энергетических материалов при низкоскоростных механических воздействиях.

В области математического моделирования разработан новый математический метод описания поведения энергетического материала при низкоскоростном ударе на основе модели механики сплошных сред. Отличительной особенностью метода является возможность учитывать взаимодействие ударника с энергетическим материалом, включая убыль кинетической энергии ударника за счёт изменения внутренней энергии материала и работу силы трения, а также описывать процессы, происходящие в тонком слое энергетического материала на контактной границе. Разработана математическая модель образования тонкого слоя в энергетическом материале, учитывающая переход от сухого трения к вязкому трению при достижении критической толщины расплава.

В области численных методов разработан численный метод расчёта температур в тонком слое энергетического материала на контактной границе с инертным ударником, основанный на использовании аналитического решения, что позволяет повысить точность расчёта и оптимизировать вычислительные затраты. Разработан алгоритм оптимизации на основе метода Нелдера–Мида для решения обратной задачи определения прочностных

параметров энергетического материала по данным натуральных экспериментов, что позволяет получать достоверные характеристики материала в условиях отсутствия прямых экспериментальных методов их измерения.

В области комплексов программ разработан программный комплекс, реализующий предложенные математические модели и численные методы, позволяющий проводить вычислительные эксперименты по низкоскоростному механическому воздействию инертного ударника на энергетический материал с учётом локального повышения температуры в тонком слое на контактной границе. Программный комплекс верифицирован на тестовой задаче и шести натуральных экспериментах, что подтверждает его адекватность и практическую применимость.

Также на основе комплексного численного исследования установлены два необходимых условия воспламенения энергетического материала при низкоскоростном ударе: достижение температуры плавления (с учётом её повышения под давлением) на контактной границе и обеспечение адиабатического режима нагрева (длительное прижатие ударника без отскока). Показано, что деформационный механизм нагрева при рассмотренных скоростях удара не способен самостоятельно вызвать зажигание, а определяющую роль играет фрикционный нагрев на контактной поверхности.

Таким образом, совокупность полученных новых результатов вносит существенный вклад в развитие теории образования горячих точек в энергетических материалах и создаёт научно-методическую основу для прогнозирования условий их безопасного обращения при низкоскоростных механических воздействиях.

5. Личный вклад соискателя и практическая значимость

Личный вклад соискателя является определяющим и заключается в непосредственном выполнении всех этапов диссертационного исследования. Автором самостоятельно разработан новый математический метод моделирования поведения энергетического материала при низкоскоростном ударе, созданы численные методы и алгоритмы, включая метод расчёта температур в тонком слое на контактной границе и алгоритм оптимизации для определения прочностных параметров. Соискателем лично реализован программный комплекс, проведены все вычислительные эксперименты, выполнена обработка и интерпретация полученных результатов, а также сформулированы научные положения и выводы, выносимые на защиту. Постановка задач осуществлялась научным руководителем, при этом их решение, включая выбор и реализацию численных методов, разработку

алгоритмов, проведение расчётов и анализ результатов, выполнено автором самостоятельно.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного программного комплекса для решения широкого круга задач, связанных с безопасным обращением взрывчатых веществ. Комплекс позволяет исследовать фрикционный механизм образования горячих точек и давать количественную оценку условий инициирования энергетического материала при низкоскоростных механических воздействиях, что имеет важное значение при планировании и подготовке экспериментов на безопасность на производстве.

Разработанный алгоритм оптимизации позволяет определять прочностные параметры энергетических материалов по данным натуральных экспериментов, что особенно ценно в условиях, когда прямое экспериментальное определение этих характеристик технически затруднено или невозможно.

Полученные в работе результаты и сформулированные на их основе рекомендации по снижению чувствительности энергетических материалов к низкоскоростным воздействиям могут быть использованы при разработке новых, более безопасных составов взрывчатых веществ и при проектировании оборудования для их транспортировки и хранения.

Внедрение результатов подтверждено актом о внедрении от ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина» (Приложение Б), где указано, что разработанная математическая модель и программный комплекс используются при планировании и подготовке экспериментов на безопасность и для решения задач, связанных с безопасным обращением взрывчатых веществ. Это свидетельствует о востребованности и практической ценности выполненного исследования.

6. Замечания по диссертационной работе

В качестве замечаний и рекомендаций к работе отмечу следующее:

1. Вычислительный подход, используемый в данной работе, получает значительное сокращение времени расчета за счет применения векторизации и параллелизации программного кода решателя. Из работы неясно, применялись ли данные технологии автором.

2. В диссертационной работе нет информации об исследовании сеточной сходимости решения соискателем.

3. Исследовалось ли влияние граничных условий на результат численного решения с целью охвата большего числа реальных сценариев обращения со взрывчатыми веществами? В работе об этом нет данных.

Заключение

Диссертационная работа Е.В. Помыкалова является законченным, самостоятельно выполненным научным исследованием, содержащим решение актуальной научно-технической задачи – разработки метода математического моделирования процесса образования горячих точек в энергетическом материале при низкоскоростном ударе с учётом фрикционного нагрева. Совокупность полученных автором новых научных результатов, включающих математический метод, численные алгоритмы и программный комплекс, составляет существенный вклад в развитие теории инициирования взрывчатых веществ и методов математического моделирования в механике сплошных сред.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается строгим математическим подходом, корректным использованием моделей механики сплошной среды, а также хорошим согласием результатов численного моделирования с данными натурных экспериментов. Разработанный программный комплекс верифицирован на тестовой задаче и шести независимых экспериментах.

Практическая значимость работы подтверждена актом о внедрении результатов в деятельность ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», где разработанные модели и программы используются при планировании экспериментов на безопасность и решении задач безопасного обращения с взрывчатыми веществами.

Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях (в том числе в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus), апробированы на международных и всероссийских конференциях, а разработанный программный комплекс зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ в части разработки новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента, реализации эффективных численных методов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ и проведения комплексных исследований научных и технических проблем с применением математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Автореферат полно и точно отражает основное содержание диссертации. Работа написана логично, научным языком, оформлена в соответствии с предъявляемыми требованиями. Диссертационная работа

Е.В. Помыкалова заслуживает положительной оценки, соответствует пп. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней» утв. постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842 (в актуальной редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

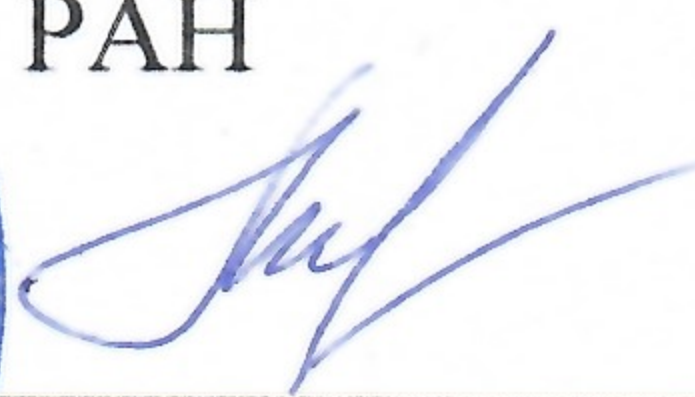
Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук (специальность 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела), доцент, научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН).



Радченко Павел Андреевич

Подпись Радченко Павла Андреевича заверяю.
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН



Матолыгина Наталья Юрьевна

14.04.2026

Радченко Павел Андреевич, научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН).

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН). пр. Академический, 2/4, г. Томск, Россия, 634055. Телефон: +7 (3822) 286-941.
E-mail: root@ispms.tomsk.ru.