

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Бойкова Дмитрия Сергеевича «Моделирование газодинамических и упругопластических процессов при интенсивном энерговкладе в твердый материал» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация Бойкова Д. С. посвящена разработке инструментария для численного моделирования поведения различных материалов под действием импульсных высокоэнергетических нагрузок. Обязательным требованием к разрабатываемой компьютерной модели была реализация сквозного численного решения без разделения на отдельные задачи от начального нагружения и испарения части материала до финальных стадий разрушения, что позволяет воспроизводить все исследуемые динамические процессы одновременно, оценивать их взаимодействие и взаимное влияние, получать и анализировать согласованное решение. Расчет может включать испытуемый образец, а также (при необходимости) и окружающую среду.

Следует подчеркнуть, что реализация предложенного в диссертации расчетного алгоритма осуществлена в рамках программного комплекса MARPLE-3D, разработанного в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, и работа Дмитрия Сергеевича может оказаться востребованной пользователями данного программного комплекса.

Диссертация представлена на 146 страницах, содержит введение, пять глав, заключение и список литературы из 109 наименований.

Во введении описаны актуальные проблемы создания новых конструкционных материалов и оценки их стойкости. Отдельно выделен такой класс задач, как исследования условий разрушения материалов под действием интенсивных импульсных нагрузок. Подробно рассмотрены экспериментальные работы НИЦ «Курчатовский институт» по изучению поведения материалов при воздействии на них сильноточного релятивистского электронного пучка. Результаты этих экспериментов были учтены при построении моделей данной диссертации и использовались для валидации созданных численных методик.

Также имеются необходимые подразделы, в которых приведено описание цели работы, задач и методов исследования, обоснование научной новизны и значимости, а также подтверждение достоверности результатов и личного вклада автора. Присутствует обязательный список положений, выносимых на защиту.

Глава 1 «Комплексная математическая модель газодинамических и упругопластических волновых процессов в твердом деформируемом материале» содержит формулировку основной системы уравнений, включающей уравнения и определяющие соотношения (кинематические, физические), описывающие гидрогазодинамику испаряемого мате-

риала, упругие, пластические волны, вязкопластические деформации и разрушение в твердом остатке мишени. Это известные модели механики сплошной среды. Автор справедливо отмечает, что одним из важных факторов, определяющих адекватность и точность газодинамических и упругопластических расчетов, является выбор уравнений состояния материала, реологических соотношений и критериев разрушения материала. Такие соотношения являются неотъемлемой частью математической модели. В данной главе содержится описание ряда моделей уравнений состояния и критериев для объемного разрушения, однако недостаточно внимания уделено обоснованию их выбора.

Глава 2 «Численная методика сквозного расчета нагрева вещества, абляционных процессов и упругопластических волновых процессов» содержит описание оригинального алгоритма, который включает согласованное моделирование газодинамических процессов в испаренном в результате энерговыклада материале и процессов в неиспаренной его части: упругопластических волн, деформаций, объемных разрушений и откольных явлений. Алгоритм основан на динамическом контроле изменения агрегатного состояния конденсированной среды с выбором соответствующего уравнения состояния и формы тензора напряжений. Выбором управляет специально введенная переменная — индикатор состояния материала, которая вычисляется на каждом временном шаге расчета в каждой ячейке расчетной сетки. В соответствии с включенными в модель критериями изменения состояния выделяются области газообразной, упругой, упругопластической, и разрушенной среды. На основании индикатора состояния в расчете учитывается только гидростатическое давление, упругие напряжения и пластические деформации. В твердотельной области используется широкодиапазонное уравнение состояния, включающее фазовые переходы и двухфазные состояния.

Для расчетов характеристик многофазных сред используется модель многокомпонентной смеси, в рамках которой предполагается, что каждая ячейка расчетной сетки может содержать только одно вещество в твердом состоянии, заполняющее эту ячейку целиком. Газы и жидкости в расчетной ячейке могут смешиваться. Различные состояния одного и того же вещества представляются как отдельные компоненты.

Нагружение исследуемого объекта описывается в форме внешней силы или объемного энерговыклада, которые учитываются в форме источника в уравнениях, выражающих законы сохранения импульса и энергии.

Для аппроксимации уравнений модели упругопластических деформаций на трехмерных сетках нерегулярной структуры используются разностные схемы повышенного порядка аппроксимации, уже реализованные и успешно применяющиеся в программном комплексе MARPLE.

Глава 3 «Программные комплексы» включает достаточно подробное описание программного комплекса MARPLE и цифровой платформы для решения мультифизических задач KDT (KIAM Digital Tool), разработанных в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН и активно используемых в научных исследованиях и производственных расчетах. Такое описание позволяет показать место разработок автора в структуре этих программных продуктов.

Подраздел 3.1.10 «Солвер механики твердого деформируемого тела» содержит описание созданных автором программных модулей, предназначенных для совместного моделирования газо- и гидродинамических процессов с учетом упругопластического поведения твердого тела, включая задание внешних источников и граничных условий. Солвер разработан с ориентацией на архитектуру высокопроизводительных распределенных вычислительных систем. Он полностью интегрирован в вычислительную платформу MARPLE и использует весь доступный функционал комплекса — от работы с гибридными нерегулярными сетками и параллельной декомпозиции до механизмов динамической конфигурации физических моделей и граничных условий.

Следует отметить, что разработанные автором программные модули существенно расширили предметную область кода MARPLE.

Для проведения массовых численных экспериментов необходим инструмент, позволяющий эффективно управлять расчетами на суперкомпьютере при минимальных требованиях к клиентскому оборудованию и программной среде пользователя. Для решения этой задачи предназначена веб-ориентированная цифровая платформа KDT. Автором была осуществлена интеграция кода MARPLE в цифровую платформу KDT: разработана утилита преобразования конфигурационных данных между форматами платформ, спроектирован и реализован графический пользовательский интерфейс расчетных модулей, подготовлены и документированы типовые сценарии использования для различных категорий пользователей (исследователь, администратор).

Глава 4 «Лагранжев код для проведения сравнительных вычислительных экспериментов» посвящена тестированию разработанной автором численной методики. Для этой цели был создан программный модуль на основе апробированной классической разностной схемы Уилкинса для решения задач нестационарной газовой динамики и динамики упругопластических сред. Этот модуль был тщательно протестирован и полученные с его помощью решения использовались для проверки математической модели и алгоритма расчета, которые представлены в диссертации. В результате сравнения было установлено, что численные решения, полученные с использованием эйлеровой и лагранжевой методик, демонстрируют высокую степень согласования, как по форме, так и по интенсивности ключевых физических эффектов — откола и объемного разрушения. Это согласование

служит весомым доказательством корректности реализации численных алгоритмов, адекватности выбранных математических моделей и надежности получаемых результатов.

Глава 5 «Моделирование воздействия сильноточных электронных пучков на конструкционные материалы» посвящена практическим задачам, решенным с помощью созданного программного обеспечения. Постановки задач соответствуют экспериментам по испытанию различных материалов, проводимым в НИЦ «Курчатовский Институт» на сильноточном электронном ускорителе «Кальмар», генерирующем релятивистские электронные пучки.

В разделе 5.1 описаны результаты моделирования воздействия релятивистским электронным пучком на образец из эпоксидной смолы при различных значениях флюенса энергии. Хорошее совпадение с данными натуральных экспериментов о волновых процессах и разрушениях в образцах и о динамике плазмы в диоде генератора продемонстрировали адекватность построенной модели и алгоритма совместного моделирования гидродинамических и упругопластических процессов.

В разделе 5.2 представлено моделирование воздействия релятивистским электронным пучком на многослойную конструкцию из свинцового покрытия, углепластика и эпоксидной смолы. В расчете показан процесс формирования трещины между слоями углепластика и эпоксидной смолы и разрушений в объеме эпоксидного слоя. Прочностные исследования многослойных материалов представляют большой интерес, поскольку они могут служить как элементами конструкций (балки, пластины, оболочки) и преградами для защиты от различных воздействий, так и прототипами слоистых композитов.

Раздел 5.3 посвящен моделированию воздействия релятивистским электронным пучком на синтактную пену — перспективный композиционный материал с дисперсным наполнителем. На примере сферопластика со связующим из эпоксидной смолы и наполнителем в виде стеклянных микросфер с вольфрамовым покрытием предложен и реализован алгоритм, включающий расчет параметров напряженно-деформированного состояния для отдельного сферического элемента, определение для него предела прочности и комплексное моделирование разрушения гетерогенного образца на подложке из алюминия под действием релятивистским электронным пучком. В процессе решения указанной задачи для воспроизведения стохастического распределения наполнителя в образце использовались расчетные сетки нерегулярной структуры и сложной геометрии. По результатам моделирования удалось выявить ряд существенных особенностей поведения синтактной пены в условиях интенсивной импульсной нагрузки. Проведенные расчеты подтверждают практическую значимость диссертационной работы и возможность применения созданного программного обеспечения в научной и инженерной практике.

Автореферат отражает содержание диссертации.

По результатам рассмотрения работы можно сделать следующие замечания.

1. В главе 1 справедливо отмечено, что уравнения состояния материалов и критерии их разрушения являются важной частью математической модели, но не обоснован их выбор.

2. В главе 5 при моделировании воздействия релятивистским электронным пучком на материалы энерговыдел учитывался в форме источника в уравнении баланса энергии. Насколько обоснован такой подход?

3. В главе 5 по результатам численного эксперимента приведены распределения давления и плотности в исследуемых образцах. Также интерес представляет и распределение температуры, которое в настоящей работе не продемонстрировано.

4. В главе 5 на рисунке 5.3 приведено сравнение результатов расчетов с опытными данными, однако отсутствуют экспериментальные погрешности.

Указанные недостатки не снижают научную ценность диссертации Бойкова Дмитрия Сергеевича. Тема диссертации является актуальной и характеризуется высоким уровнем научной проработки. Автором разработана и реализована численная методика в рамках программного комплекса MARPLE, существенно расширяющая предметную область данного комплекса. Следует подчеркнуть, что Дмитрий Сергеевич продемонстрировал умение внедрять создаваемые модули в существующие программные продукты. Диссертация является законченным научным исследованием, соответствует паспорту специальности и требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Бойков Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв составил заведующий лабораторией № 16 широкодиапазонных уравнений состояния Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

к. ф.-м. н., с. н. с.

К. За

Хищенко Константин Владимирович
29.12.2025

Подпись Хищенко Константина Владимировича удостоверяю.

Ученый секретарь ОИВТ РАН

д. ф.-м. н.



Киверин Алексей Дмитриевич
29.12.2025

125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук. Тел. +7 (495) 484-2483. konst@ihed.ras.ru. Сайт организации: <https://jihtr.ru/>.