

ОТЗЫВ

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

Важным направлением современного математического моделирования является численный анализ процессов деформации и разрушения элементов конструкций при действии на них механических и тепловых нагрузок, а также при воздействии ультрарелятивистского электронного пучка (РЭП). Такой анализ предоставляет большие возможности при проектировании разнообразных технических устройств. Несомненно, перспективны исследования поведения изделий, изготовленных из композиционных материалов. Натурные испытания на разрушение инженерных конструкций из таких материалов, как правило, весьма дороги, поэтому экспериментальные исследования обычно проводят с небольшими образцами, имеющими упрощенную форму, а для прочностного анализа конструкций используют математические модели и программные комплексы. Этим определяется актуальность темы диссертации.

Научная новизна диссертации определяется тем, что в ней реализован единый подход к численному моделированию процессов, происходящих при интенсивном энергетическом воздействии на элемент конструкции, включая изменение агрегатного состояния вещества. При этом используется сквозная методика расчета, не требующая решения отдельных задач для областей, в которых вещество находится в различных агрегатных состояниях. Такой подход позволяет исследовать взаимное влияние процессов, имеющих различную физическую природу.

В диссертации получены следующие научные результаты:

1. Разработана комплексная математическая модель

термомеханических явлений, происходящих в твердом деформируемом материале в результате действия интенсивных потоков энергии.

Модель построена на основе известных уравнений механики сплошной среды. Новизна состоит в том, что при моделировании учитываются процессы, существенные для твердотельных материалов, подвергшихся импульсному высокоэнергетическому воздействию, а именно: упругое деформирование, упругопластические процессы (в рамках модели Прандтля-Рейса с условиями пластичности Мизеса и Мизеса-Шлейхера), упруговязкопластические процессы (включая релаксацию напряжений), а также гидродинамические процессы, происходящие в газообразном веществе, которое образуется при сублимации. Модель дополнена критериями разрушения материалов (критерий максимального напряжения, квадратичный критерий Мизеса — Хилла, интегральный критерий Тулера — Бутчера) и широкодиапазонными уравнениями состояния. Динамическое нагружение исследуемого образца описывается в форме внешней силы и/или объемного энерговклада.

2. Разработан алгоритм сквозного расчета нагрева, испарения, динамики испаренного вещества и упругопластических волновых процессов, приводящих к разрушениям в неиспаренном твердом материале, основанный на методике динамического контроля изменения агрегатного состояния конденсированной среды.

Новизна алгоритма заключается в введении переменной состояния среды, значение которой (0 – газообразная, 1 – упругая, 2 – упругопластическая, 3 – область разрушения) определяется на основании критериев модели. При расширении модели могут быть введены дополнительные значения индикатора состояния, соответствующие новым состояниям материала, включаемым в модель. В зависимости от значения индикатора состояния в каждой ячейке расчетной сетки выбирается форма тензора напряжений и уравнение состояния.

Для моделирования динамики многоматериальной и многофазной среды применяется модель многокомпонентной смеси. Для каждой компоненты

смеси решается отдельное уравнение неразрывности, но уравнения импульса и энергии общие для всей смеси. Между компонентами имеет место механическое и термодинамическое равновесие. Различные состояния одного и того же вещества рассчитываются как отдельные компоненты. В каждой ячейке расчетной сетки может находиться только одно вещество в твердом состоянии, заполняющее эту ячейку целиком. Газы и жидкости в расчетной ячейке могут смешиваться.

Процедура интегрирования по времени реализует принцип суммарной аппроксимации основной системы уравнений на основе расщепления по физическим процессам. Для решения гидродинамической подсистемы применяется модифицированная схема Лакса-Фридрихса с линейной реконструкцией величин при вычислении потоков и с последующей их коррекцией (ограничение потоков с помощью процедуры “minmod”), для уравнений параболического типа (например, уравнение теплопроводности) – схема на основе метода Галеркина с разрывными базисными функциями.

3. Выполнена программная реализация разработанного алгоритма согласованного решения задач гидродинамики и упругопластики на основе объектно-ориентированного проектирования и программирования с использованием языка C++ (стандарт C++ 14 / C++ 17) с использованием библиотеки OpenMPI в виде предметно-ориентированной версии кода, включенной в состав вычислительной платформы MARPLE. Интеграция вычислительной платформы MARPLE в цифровую платформу для решения сложных мультифизических задач KIAM Digital Tool.

Разработанный автором алгоритм реализован в программном комплексе MARPLE (разработка ИПМ РАН), который представляет собой расширяемую вычислительную платформу для решения различных задач механики сплошных сред, позволяющую проводить многоцелевые численные эксперименты. В код были инкорпорированы новые программные модули, осуществляющие решение основной системы уравнений в декартовых координатах в полной трехмерной постановке на сетках нерегулярной структуры в режиме распределённой памяти. При реализации в максимальной

степени использовалась уже имеющаяся в коде инфраструктура. Важной частью создания нового программного обеспечения, позволяющего проводить массовые вычислительные эксперименты в области исследования свойств материалов при интенсивных энергетических воздействиях, была интеграция кода MARPLE в цифровую платформу KIAM Digital Tool (разработка ИПМ РАН), которая представляет собой веб-ориентированную систему и сочетает гибкость интеграции прикладных программ с удобством графического управления, что оказалось критически важным для постановки и анализа мультифизических задач.

4. Выполнены вычислительные эксперименты по моделированию разрушения полимерных и композиционных материалов под действием релятивистских электронных пучков высокой интенсивности, оценки прочностных характеристик исследованных материалов.

Практическая часть работы была ориентирована на актуальные эксперименты по испытаниям материалов действием релятивистских электронных пучков в НИЦ «Курчатовский Институт».

Расчеты воздействия РЭП на мишени из эпоксидной смолы, для которых имеется большое количество экспериментальных данных, позволили провести тщательную валидацию разработанной численной методики и созданного ПО, а также дополнить наблюдаемую в экспериментах картину взаимодействия мишени с РЭП.

Моделирование многослойной конструкции было нацелено на изучение поведения различных конфигураций слоев при динамических нагрузках, выявление и визуализацию процессов, приводящих к их разрушению. Разработанный подход может применяться для оптимизации многослойных конструкций и для микромеханического анализа композиционных материалов, например, слоистых композитов на основе углепластиков.

Наиболее полно возможности развиваемого в диссертации подхода продемонстрировало моделирование воздействия РЭП на композиционный материал с дисперсным наполнителем. В экспериментах НИЦ КИ изучались сферопластики (синтактные пены), формируемые на основе полимерного

связующего и стеклянных микросфер, поверхности которых модифицированы металлическим покрытием, позволяющим повысить их электропроводность и, соответственно, степень экранирования электромагнитных полей.

Непосредственное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) сферопластика – достаточно трудоемкая вычислительная задача. Плотность расположения сферических включений в связующем весьма высокая, в 1 мм^3 композиционного материала содержится $\sim 10^3$ сферических включений. Реалистичным выглядит подход, в котором на первом этапе проводится расчет НДС для отдельного сферического элемента, нагруженного волной давления. Такой расчет позволяет определить условия разрушения микросферы. Следующий этап заключается в моделировании макроскопического образца гетерогенного материала, в котором свойства наполнителя получены из предыдущего расчета. После этого возможно проделать процедуру осреднения свойств гетерогенного материала.

Расчеты проводились на гибридной сетке нерегулярной структуры, состоящей из тетраэдров и треугольных призм. Количество расчетных ячеек было около 10^7 .

Выполненные расчеты продемонстрировали адекватность построенной модели и эффективность предложенных подходов к совместному моделированию гидродинамических и упругопластических процессов.

Достоверность выполненных исследований обоснована использованием апробированных физических и математических моделей, численных методов и технологий программирования. Для верификации моделей, алгоритмов и их программных реализаций использовались опубликованные в научной литературе модельные постановки задач с известными аналитическими и численными решениями и экспериментальные данные.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 20 научных статьях, из них 19 входят в перечень ВАК, 3 индексируются в базе данных Web of Science (WoS), 8 индексируются в базе данных Scopus. Две статьи написаны без соавторов. Получены свидетельства о государственной регистрации двух программ для ЭВМ. Лично и с соавторами было представлено 8 докладов на

профильных научных конференциях.

Замечания

1. Было бы желательно привести в диссертации запись какой-либо разностной схемы, используемой при расчетах.
2. На рис. 4.6 отсутствует шкала. Неясно, какая компонента тензора деформаций показана на этом рисунке.
3. При сравнительном анализе результатов моделирования по эйлеровой и лагранжевой методикам (параграф 4.1) было бы целесообразно привести сведения о величине деформации в теле, для которого выполнялся расчет.
4. Неясно, какая компонента вектора скорости показана на рис. 5.23.
5. Подход к многомасштабному моделированию, реализованный в работе (параграф 5.3.2) на примере моделирования разрушения образца из синтактной пены, было бы желательно изложить более подробно.
6. Фразу в заключении «Создано новое программное обеспечение, позволяющее проводить массовые вычислительные эксперименты в области исследования свойств материалов...», желательно было дополнить словами «и конструкций». Аналогичное замечание справедливо и для фразы «Проведены вычислительные эксперименты с целью изучения разрушения полимерных и композиционных материалов...».

Указанные замечания не влияют на окончательную оценку диссертационной работы. Считаю, что диссертационная работа Бойкова Дмитрия Сергеевича соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.2.2.

Заключение

Диссертация Бойкова Дмитрия Сергеевича на тему: «Моделирование газодинамических и упругопластических процессов при интенсивном энерговыделении в твердый материал», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности

1.2.2 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, является законченной научно-квалификационной работой и соответствует паспорту этой научной специальности.

Диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Бойков Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.2.2 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Я, Зингерман Константин Моисеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

24 декабря 2025 года.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой математического моделирования и вычислительной математики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»,
доктор физико-математических наук,

профессор

170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33

Тел.: +7-4822-580522

E-mail: zingerman.km@tversu.ru

Зингерман К.М.

Подпись К.М. Зингермана удостоверяю.

И.о. проректора по научной деятельности

