

## УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
по опытно-конструкторским и  
проектно-конструкторским работам

АО «ФЦДТ «Союз»,

д.т.н., член-корреспондент РАН

Д.Н. Садовничий

12 2025 года



## ОТЗЫВ

### ведущей организации

Акционерного общества «Федеральный центр двойных технологий «Союз»  
о научно-практической значимости диссертации Бойкова Дмитрия Сергеевича  
на тему «Моделирование газодинамических и упругопластических процессов при  
интенсивном энерговыделении в твердый материал»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Актуальность диссертационной работы связана с необходимостью при создании материалов и конструкций ракетно-космической техники решения широкого класса прикладных задач моделирования газодинамических и упругопластических процессов при интенсивном энерговыделении в геометрически сложных объектах, в том числе защитных покрытиях, описания быстропотекающих процессов с учетом существенно трехмерных эффектов распространения ударных волн и механического разрушения. В настоящее время разработан ряд коммерческих программ описания ударно-волнового и динамического поведения твердых материалов, однако проблемными остаются вопросы сопряженных, мультифизических моделей и численных программ при одновременном протекании газодинамических процессов и механического разрушения при переходе твердого материала в другое агрегатное состояние, пластических деформациях, объемном разрушении материала и откольных явлений.

Быстрое развитие суперкомпьютерных технологий позволяет подойти к решению сложных ресурсоемких задач, однако при этом требует создания научных кодов, сочетающих современные физические модели и численные методики с передовыми технологиями разработки компьютерных алгоритмов и программирования. Кроме того, в ракетно-космической технике широко внедряются новые полимерные композиционные материалы, обладающих комплексом ценных свойств: низкая теплопроводность, высокая удельная прочность, термостойкость, что ставит задачу изучения их поведения при воздействии интенсивных потоков электронного излучения. Проведенный автором во введении диссертационной работы достаточно полный анализ показал, что выбранная тема диссертационной работы Бойкова Д.С. безусловно актуальна и направлена на создание методики и математического кода сквозного расчета, в котором на основании обоснованных критериев изменения состояния уравнений при интенсивном энерговыделении в твердом материале выбирается модель его термодинамических и упруго-пластических свойств и соответствующим образом модифицируется решаемая система.

Оценка содержания, завершенности и научной новизны диссертационной работы. Диссертационная работа Бойкова Д. С. изложена на 146 листах и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 109 библиографических наименований. Автор достаточно убедительно обосновал выбор темы исследований и четко сформулировал научную задачу.

Первая глава посвящена разработке на основе моделей механики сплошной среды комплексной математической модели газодинамических процессов и упругопластических волновых процессов в деформируемом твердом теле при воздействии на нее интенсивных потоков энергии. Автором построена математическая модель, использующая уравнения динамики сплошной среды, согласованные с газодинамическими процессами в испаренном материале, пластическими течениями, упругими деформациями, разрушением и откольными явлениями. В предлагаемых методиках использовались заранее рассчитанные уравнения состояния (УРС) в табличной форме, подготовленные с помощью программного комплекса ТЕРМОС. Отмечено, что одной из наиболее важных задач численного моделирования разрушения является выбор критериев разрушения для видов напряженно-деформированного состояния, создаваемых воздействием интенсивных импульсных излучений.

Во второй главе автором изложен алгоритм сквозного расчета нагрева, абляции материала объекта воздействия, течения газоплазменного потока, а также формирования импульса отдачи в твердом материале, приводящего к возникновению упругопластических волн и, при достаточно высокой амплитуде напряжений, к разрушениям. Алгоритм основан на динамическом контроле изменения агрегатного состояния конденсированной среды с выбором соответствующего УРС и формы тензора напряжений. Моделирование выполняется на трехмерных пространственных сетках, адаптированных к границе расчетной области и структуре изучаемых объектов, в том числе используются сетки нерегулярной структуры с разными типами элементов (тетраэдры, гексаэдры, треугольные призмы), блочно структурированные сетки, иерархические локально-адаптивные сетки. Все расчетные величины определены в ячейках сетки, при построении разностных схем используются средние значения по ячейке. Процедура интегрирования по времени реализует принцип суммарной аппроксимации основной системы уравнений на основе расщепления по физическим процессам. 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.

В третьей главе дано описание нового программного обеспечения, разработанного автором, для проведения массовых вычислительных экспериментов в области исследования свойств материалов при интенсивных воздействиях электронного облучения. Разработана цифровая платформа в виде клиент-серверной системы, поддерживающей динамическую интеграцию удалённых вычислительных ресурсов и проблемно-ориентированных приложений для проведения расчётов на суперкомпьютерных комплексах. Это позволило устранить ряд практических ограничений: зависимость от операционной системы, нехватку вычислительных ресурсов на клиенте, сложность синхронизации версий программного обеспечения.

Разработана новая утилита преобразования конфигурационных данных между вычислительной платформой MARPLE и цифровой платформой для решения сложных мультифизических задач KIAM Digital Tool. Спроектирован и реализован графический пользовательский интерфейс расчетных кодов, предоставлены и документированы типичные сценарии использования цифровой платформы для каждого из типов пользовательского аккаунта.

В четвертой главе представлены вычислительные эксперименты для сравнительного моделирования и верификации развитой в третьей главе диссертационной работы эйлеровой методики расчета упругопластических деформаций с результатами, полученными по лагранжевой методике расчета. Оба метода были реализованы с использованием консервативных схем, обеспечивающих выполнение законов сохранения массы, импульса и энергии. Сравнительный анализ проведен на задаче прогиба оболочки конечной длины от действия локальной импульсной нагрузки. Установлено, что численные решения, полученные с использованием эйлеровой и лагранжевой методик, демонстрируют высокую степень согласования как по форме, так и величине таких физических эффектов как откол и объемное разрушение.

Пятая глава посвящена решению практически важных задач воздействия интенсивного электронного пучка на конструкционные материалы. Сравнение численных экспериментов проведено с результатами испытаний материалов в условиях воздействия электронного излучения ускорителя «Кальмар». Энерговыведение от воздействия РЭП было рассчитано с помощью программы математического моделирования каскадных процессов переноса излучения в гетерогенных материалах (разработка ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) и далее использовано в расчетах в качестве источника в уравнении энергетического баланса.

Сравнение результатов, полученных по разработанной автором программой среде, с экспериментальными результатами выполнено на примере твердой эпоксидной смолы и показало удовлетворительное согласие для значений флюенсов энергии от  $150 \text{ Дж/см}^2$  до  $650 \text{ Дж/см}^2$  по таким параметрам как скорость разлета испаренного вещества, величина испаренной массы и генерация механического импульса давления. С использованием сквозного моделирования сопряженной задачи по критерию главных напряжений удалось объяснить ранее обнаруженные экспериментально три зоны разрушения эпоксидной смолы, связанных с абляцией облучаемой области, объемным разрушением и откольным разрушением на тыльной части образца.

В качестве примера применения разработанной автором программной среды представлены результаты распределения плотности, давления и областей разрушения при воздействии потока электронов ускорителя «Кальмар» на многослойную преграду, состоящую из свинца, углепластика и эпоксидной смолы. Изучены эффекты

взаимодействия отраженных волн и разрушения между слоями материалов многослойной конструкции.

Показаны возможности разработанного программного обеспечения для оптимизации синтактных пен (сферопластиков) к воздействию удароволновых нагрузок при воздействии субмикросекундных импульсов электронного облучения. Получены новые результаты моделирования разрушения синтактных пен в результате неоднородного распределения давления по поверхности микросферы, локализованных пластических течений и фрагментации микросфер. Результаты моделирования хорошо согласуются с известными представлениями о динамическом поведении синтактических пен при воздействии высокоскоростных нагрузок.

В целом разработанные автором алгоритмы и программная оболочка сквозного моделирования связанных газодинамических и упругопластических процессов при воздействии интенсивного электронного излучения, а также полученные автором результаты моделирования типовых материалов и конструкций из полимерных материалов имеют высокую теоретическую значимость, являются новыми и обладают научной новизной, а также практической значимостью для разработки и оптимизации материалов ракетно-космической техники.

Опубликованные Бойковым Д.С. научные труды в полной мере отражают содержание диссертации и соответствуют основным идеям и выводам диссертации. Научные положения, выносимые на защиту, достаточно полно отражены в опубликованных работах.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Достоверность полученных автором результатов и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждена использованием корректных самосогласованных уравнений газодинамики и теории упругопластического поведения деформируемых материалов, применением современных численных методов и технологий суперкомпьютерного программирования. Для верификации моделей, алгоритмов и их программных реализаций использовались опубликованные в научной литературе модельные постановки с известными аналитическими и численными решениями и экспериментальные данные.

Несомненным достоинством диссертационной работы Бойкова Д. С. является использованием современного математического аппарата и методов суперкомпьютерного программирования. Основные научные положения, выводы и

рекомендации, сформулированные автором, отражают новизну работы и свидетельствуют о ее практической значимости.

Полученные автором результаты могут быть внедрены для решения практических задач в АО «ФЦДТ «Союз», АО «Корпорации МИТ», АО «ГРЦ Макеева», АО «ВПК «НПО Машиностроения», ФГКУ «12 ЦНИИ» МО РФ, а также для чтения лекций студентам ФГАОУ ВО «МГТУ им. Баумана (НИУ)», ФГАОУ ВО «МФТИ (НИУ)», ФГАОУ ВО «МАИ (НИУ)», ФГАОУ ВО «НИ ТГУ».

Тем не менее, по работе имеются ряд замечаний:

1. При использовании главных напряжений в качестве критерия разрушения указано, что образование зоны разрушения в объеме эпоксидной смолы вызвано растягивающими напряжениями под действием квазисферических волн (стр. 112 диссертационной работы). Однако на стр. 33 утверждается, что область объемного разрушения подвержена исключительно сжатию.
2. Из рисунка 5.5 следует, что форма расчетной области объемного разрушения отвержденной эпоксидной смолы не соответствует наблюдаемой экспериментально. Автор не обсуждает отмеченное расхождение.
3. Учитывая, что источником генерации ударно-волновых напряжений и последующего разрушения образцов является воздействие импульсного электронного облучения, автор не уделил внимания собственно формированию зоны энерговыделения, что снижает общность полученных результатов.
4. Выбор критериев прочности проведен без учета вида напряженного состояния и длительности воздействия на предельные характеристики материалов, что может сказываться на выводах о возможности образовании трещин или расслоений.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости работы в целом. Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и соответствует специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

### **Заключение**

Диссертационная работа Бойкова Дмитрия Сергеевича на тему «Моделирование газодинамических и упругопластических процессов при интенсивном энерговыделении в твердый материал», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

является научно-квалификационной работой, содержащей решение важной научной задачи в части согласованного моделированию газодинамических и упругопластических процессов при интенсивном энерговыделении, имеющей важное значение для развития ракетно-космической техники. По объему публикаций и исследований, актуальности, научной новизне и практической значимости полученных результатов соответствует критериям, установленным пп. 9, 10, 11, 13 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Бойков Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании НТС научно-технического отделения НТО-1 АО «ФЦДТ «Союз», протокол заседания № 10/НТО-1 от 24.12.2025г.

Отзыв составили:

начальник научно-технического  
отделения НТО-1 АО «ФЦДТ «Союз», к.т.н.  
« 24 » 12 2025 года

Д.В. Жестерев

ведущий инженер-технолог  
научно-технического отделения НТО-1  
АО «ФЦДТ «Союз», к.т.н.  
« 24 » 12 2025 года

Е.В. Богданова

Адрес организации: 140090, г. Дзержинский, ул. Академика Жукова, д. 42  
Наименование организации: Акционерное общество «Федеральный центр двойных технологий «Союз»  
e-mail: soyuz@fcdt.ru, факс: 8 (495) 551-11-44  
тел.: 8(495) 551-71-35, 77-38

Подписи сотрудников АО «ФЦДТ «Союз»: Жестерева Дениса Вячеславовича,  
Богдановой Елизаветы Владимировны заверяю  
Начальник отдела управления персоналом  
АО «ФЦДТ «Союз»  
« 24 » 12 2025 года



Е.С. Волченкова