

*На правах рукописи*

Бойков Дмитрий Сергеевич

**Моделирование газодинамических и упругопластических процессов при  
интенсивном энергокладе в твердый материал**

Специальность 1.2.2 — Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

- Научный руководитель: **Ольховская Ольга Гургеновна**,  
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ИПМ им.  
М.В. Келдыша РАН
- Официальные оппоненты: **Зингерман Константин Моисеевич**, д. ф.-м. н.,  
профессор, заведующий кафедрой  
математического моделирования и  
вычислительной математики Тверского  
государственного университета  
**Хищенко Константин Владимирович**, к. ф.-м. н.,  
заведующий лабораторией – широкодиапазонных  
уравнений состояния Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенный институт высоких температур РАН  
(ОИВТ РАН)
- Ведущая организация: АО «Федеральный центр двойных технологий  
«Союз» (г. Дзержинский, МО)

Защита состоится 29 января 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного  
совета 24.1.237.01, созданного на базе ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,  
расположенного по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМ им. М.В.  
Келдыша РАН <https://keldysh.ru/council/3/D00202403/defence3.html>

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.1.237.01

к.ф.-м.н.

М.А. Корнилина

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

В современных инженерных разработках широкое применение нашли численные методики оценки стойкости различных конструкционных материалов – как однородных, так и композиционных, армированных, градиентных и др. Соответствующие исследования существенно облегчают создание материалов, которые по своим параметрам должны превосходить традиционные материалы, например, металлы, и в будущем заменить их в силу технологических, экологических и других условий. Так, например, известно, что композиты обладают высокой удельной прочностью, жёсткостью и износостойкостью, что позволяет использовать их для создания новых классов конструкций. Весьма активно проводятся работы по использованию этих материалов в аэрокосмической отрасли при проектировании и создании летательных аппаратов. Композиционные материалы прочны, не подвержены коррозии, имеют малый вес, что облегчает транспортировку и монтаж изделий на их основе. По этим причинам предлагается использовать композиционные материалы для магистральных трубопроводов, в частности, проектируемых для эксплуатации в северных регионах. Подобных примеров можно привести множество, что говорит об актуальности разработки прикладного программного обеспечения для исследований в данной предметной области.

Одним из факторов, сдерживающих широкое распространение новых материалов при создании испытывающих нагрузки конструкций, является отсутствие в настоящий момент достаточно полной теории поведения конструкционных материалов при различных режимах нагружения, что вызывает необходимость проведения больших объемов экспериментальных исследований для определения характеристик композитов с целью последующего включения в полуэмпирические теории. Однако экспериментальное исследование свойств, включая определение условий разрушения материалов, представляет собой трудоемкую и дорогостоящую задачу. В связи с этим актуальным является создание средств предсказательного моделирования, которое становится все более надежным благодаря применению высокопроизводительной техники, допускающей моделирование процессов на сильно различающихся пространственно-временных масштабах. Надо отметить особую важность разработки средств предсказательного моделирования для анализа процессов при динамическом, интенсивном нагружении.

Натурные испытания на разрушение инженерных конструкций из новых материалов, как правило, весьма дороги. В большинстве случаев исследуются лишь небольшие образцы из новых материалов, имеющие упрощенную форму. Вычислительный эксперимент позволяет восполнить многие пробелы экспериментальной части исследований. Так, моделирование позволяет определить характеристики разрушающего воздействия, которые трудно

измерить непосредственно с приемлемой точностью. Например, если образцы подвергаются действию потока электронов высокой энергии или лазерного излучения, импульс отдачи, формируемый в образце в результате воздействия реактивных сил, может быть найден в результате гидродинамического расчета, объединенного в методике сквозного типа с расчетом упругопластических волн в неиспаренной части материала.

Решение этих задач требует создания научных кодов, сочетающих современные физические модели и численные методики с передовыми технологиями разработки компьютерных алгоритмов и программирования, и предназначенных для эксплуатации на суперкомпьютерах гибридной архитектуры. Использование современных и перспективных суперкомпьютеров выдвигает новые требования как к численным методам, так и к используемому программному обеспечению, особенно в части надежности, отказоустойчивости и сопровождения (например, модификация кодов по мере эксплуатации с целью лучшего учета архитектурных особенностей вычислительных систем).

Вычислительные эксперименты с набором моделей поведения материалов являются инструментом для определения их прочностных характеристик посредством решения обратных задач с использованием данных многопараметрических численных исследований и экспериментальных результатов. Для обеспечения достоверности таких исследований большое значение приобретает верификация созданных кодов и методик на экспериментальных данных, в том числе и для материалов с известными свойствами. После верификации модели ее можно использовать для полномасштабного моделирования реальных конструкций с целью анализа их прочности при различных воздействиях.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является исследование термомеханических процессов, происходящих в полимерных и композиционных материалах при воздействии на них интенсивных динамических нагрузок.

### **Задачи работы**

Для достижения цели диссертационной работы были поставлены и решены следующие задачи.

1. Разработка на основе моделей механики сплошной среды широкодиапазонной математической модели динамических процессов в конденсированной среде при воздействии на нее интенсивных потоков энергии.
2. Разработка численных алгоритмов совместного моделирования газодинамических волн в испаренном материале и динамических волновых процессов в области упругопластического материала с учетом его возможного разрушения.
3. Создание программного обеспечения, предназначенного для сквозного расчета газодинамических и термомеханических нелинейных волновых

процессов, приводящих к внутренним разрушениям в материале и откольным явлениям.

4. Моделирование разрушения полимерных и композиционных материалов под действием электронных пучков.

### **Методы исследования**

Основным методом исследований в диссертационной работе является математическое моделирование.

Исследование поведения материалов при интенсивном высокоэнергетическом воздействии основано на моделях упругой деформации и пластического течения с реологическими моделями линейно упругой среды (закон Гука), упругопластической (модель Прандтля-Рейса с условиями пластичности Мизеса и Мизеса-Шлейхера, модель Максвелла) и упруговязкопластической среды с учетом релаксации касательных напряжений. Для исследования откольного разрушения материалов при ударно-волновых нагружениях будут применяться критерии, учитывающие время действия напряжения (интеграл повреждений Тулера– Бучера). Исследование динамики вещества, образующегося при испарении твердотельных образцов, основано на моделях гидродинамики.

Численное решение названных задач выполняется сеточным методом с использованием разностных схем повышенного порядка аппроксимации (модифицированной схемы Лакса-Фридрихса, схемы коррекции потоков), схем на основе метода Галеркина с разрывными базисными функциями). Данные подходы известны и широко используются, однако их применение для конкретных задач и различных типов расчетных сеток требует адаптации и оптимизации, что и было осуществлено в рамках данной работы. В частности, при разработках разностных схем, соответствующих мультифизическим физико-математическим моделям механики сплошных сред, высокотемпературных явлений и быстропротекающих процессов, принципиальное значение имеет, наряду с общими требованиями консервативности, выполнение принципов интегральной согласованности балансов полной энергии и ее отдельных видов (внутренней, кинетической, электромагнитного поля) таким образом, чтобы устранить влияние нефизических источников энергии аппроксимационного характера.

Для расчетов использовались трехмерные сетки, адаптированные к границе расчетной области и структуре изучаемых объектов, в том числе сетки нерегулярной структуры с разными типами элементов (тетраэдры, гексаэдры, треугольные призмы), блочно-структурированные сетки, иерархические локально-адаптивные сетки.

Моделирование выполнялось средствами кода MARPLE-3D, разработанного в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН<sup>1</sup> с использованием

---

<sup>1</sup> V. A. Gasilov, A. S. Boldarev, O. G. Olkhovskaya, D. S. Boykov, Yu. S. Sharova, N. O. Savenko, A. M. Kotelnikov, “MARPLE: software for multiphysics modelling in continuous media”, *Вычислительные методы и программирование*, 24:4 (2023), 316–338

широкодиапазонных уравнений состояния, построенных программой THERMOS (ИПМ РАН)<sup>2</sup>. В коде MARPLE используются современные вычислительные технологии, MARPLE написан на C++ и работает в параллельном режиме как MPI приложение для высокопроизводительных вычислительных систем. В настоящее время MARPLE эксплуатируется как расширяемая и модифицируемая вычислительная платформа для решения различных задач механики сплошных сред.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Построенная комплексная компьютерная модель основана на известных моделях механики сплошных сред, *новым* в ней является согласованный расчет газодинамических процессов в испаренном материале, упругих деформаций, пластических течений, объемного разрушения материала и откольных явлений без разделения решения на отдельные задачи. Расчетная область при этом может включать как сам испытуемый образец, так, при необходимости, и окружающую его среду. Данный подход позволяет воспроизводить все исследуемые динамические процессы одновременно, оценивать их взаимодействие и взаимное влияние, получать и анализировать согласованное решение.
2. Разработаны *новая* методика динамического контроля изменения агрегатного состояния конденсированной среды с выбором соответствующего уравнения состояния и формы учета тензора напряжений и основанный на ней алгоритм совместного расчета нагрева, испарения, динамики испаренного вещества и упругопластических волновых процессов, приводящих к разрушениям в неиспаренном твердом материале. Алгоритм использует описание многокомпонентных многофазных течений в терминах плотностей компонент среды.
3. Создано *новое* программное обеспечение, позволяющее проводить массовые вычислительные эксперименты в области исследования свойств материалов при интенсивных энергетических воздействиях.
4. Получены *новые* результаты моделирования экспериментов по испытаниям полимерных и композитных материалов на установке "Кальмар" в НИЦ "Курчатовский институт".

### **Достоверность результатов**

Достоверность выполненных исследований обоснована тем, что методология исследования базируется на современных физических и математических моделях, численных методах, и технологиях программирования. Для верификации моделей, алгоритмов и их программных реализаций использовались опубликованные в научной литературе модельные постановки с известными аналитическими и численными решениями, сравнение с расчетами по апробированным методикам и экспериментальные данные.

---

<sup>2</sup> <https://keldysh.ru/cgi/thermos/navigation.pl?ru,home>

### **Практическая значимость работы**

Разработки диссертационной работы найдут применение в инновационных научно-исследовательских и прикладных работах, требующих решения задач физической механики большой вычислительной сложности, а именно: изучении разрушения перспективных полимерных и композитных материалов под действием различных нагрузок. Созданное программное обеспечение может быть использовано при анализе динамических воздействий на материалы и конструкции в инженерной практике, для верификации моделей объёмных разрушений и отколов в хрупких материалах, а также для валидации широкодиапазонных уравнений состояния материалов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Комплексная компьютерная модель термомеханических явлений, происходящих в твердом деформируемом материале в результате действия интенсивных потоков энергии.
2. 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.
3. 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.
4. Результаты вычислительных экспериментов по моделированию разрушения полимерных и композиционных материалов под действием релятивистских электронных пучков высокой интенсивности, оценки прочностных характеристик исследованных материалов.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертационной работы были доложены на следующих профильных научных конференциях:

1. **Boikov D. S.** Dynamics of a microsphere with a double-layered shell in a polymer matrix under the action of a shock wave // 17th International Conference “Gas Discharge Plasmas and Their Applications” (GDP 2025) Ekaterinburg, Russia, 2025
2. **Boikov D. S.** End-to-end calculation of thermomechanical processes in composite and heterogeneous materials with dynamic control of the state of aggregation // 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024), Tomsk, Russia, 2024.
3. Smirnova A. R., **Boikov D. S.**, Tkachenko S. I., Kazakov E. D. Study of the influence of diode plasma of a high-current electron accelerator “Kalmar” on the

- formation of shock waves in transparent targets // 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024), Tomsk, Russia, 2024.
4. **Boikov D. S.** End-to-end calculation of thermomechanical phenomena in a solid with dynamic control of the aggregate state // XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2024) Kabardino-Balkar Republic of the Russian Federation, 2024
  5. Смирнова А. Р., **Бойков Д. С.**, Казаков Е. Д., Ольховская О. Г., Ткаченко С. И. Моделирование распространения ударных волн в полимерных мишенях, с учётом взаимодействия катодной и анодной плазм в диодном зазоре сильноточного электронного ускорителя «КАЛЬМАР» // LI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, РФ, 2024 г.
  6. Смирнова А. Р., **Бойков Д. С.**, Казаков Е. Д., Ольховская О. Г., Ткаченко С. И. Моделирование влияния катодной плазмы на параметры плазмы факела в диодном зазоре сильноточного электронного ускорителя «КАЛЬМАР». // L Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, РФ, 2023 г.
  7. Olkhovskaya O., **Boikov D.**, Gasilov V., Tkachenko S., Smirnova A. Study of processes in polymer targets under high-energy exposure // 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, Tomsk, Russia, 2022.
  8. Sharova Y. S., **Boikov D. S.**, Beklemysheva K. A., Vasyukov A. V., Petrov I. B the fracture of materials under intensive short-time loads. // 45th International Conference on Application of Mathematics in Engineering and Economics, AMEE 2019, Sozopol, Bulgaria, 2019

### **Публикации**

Результаты проведенных исследований опубликованы в 20 научных статьях, список которых представлен в конце автореферата. Их них 17 входят в перечень ВАК, 11 индексируются в базах данных Web of Science (WoS) и Scopus.

В результате выполнения диссертационной получены свидетельства о государственной регистрации трех программ для ЭВМ.

1. "ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС MARPLE ВЕРСИЯ 2" Гасилов В.А., Савенко Н.О., Котельников А.М., Болдарев А.С., Ольховская О.Г., Бойков Д.С. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025668173, 11.07.2025. Заявка № 205666399 от 01.07.2025.
2. "СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС "СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ" Багдасаров Г.А., Бойков Д.С., Болдарев А.С., Гасилов В.А., Грушин А.С., Ольховская О.Г., Поляков С.В., Пузырьков Д.В., Тарасов Н.И., Усков Р.В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021615641, 09.04.2021. Заявка № 2021614671 от 02.04.2021.
3. ПРОГРАММНЫЕ МОДУЛИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТОВ ТЕПЛОВОГО И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО

ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОБЪЕКТЫ Багдасаров Г.А., Бойков Д.С., Болдарев А.С., Гасилов В.А., Ольховская О.Г. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019617547, 17.06.2019. Заявка № 2019616469 от 04.06.2019.

### **Личный вклад автора**

Лично автором выполнены:

- формулировка комплексной компьютерной модели термомеханических явлений в твердом деформируемом материале;
- разработка алгоритма совместного расчета нагрева, испарения, динамики испаренного вещества и упругопластических волновых процессов, приводящих к разрушениям в неиспаренном твердом материале.
- реализация данной численной методики в программном комплексе MARPLE и интеграция вычислительной платформы MARPLE в цифровую платформу для решения сложных мультифизических задач KIAM Digital Tool;
- проведение всех расчетов и анализ полученных результатов.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 146 страниц, включая 57 рисунков. Список литературы содержит 109 наименований.

### **Поддержка работы**

Вычисления проводились с помощью гибридного суперкомпьютера К60, установленного в Суперкомпьютерном Центре коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Работа была поддержана грантами РНФ 21-11-00362, 23-21-00248, 25-61-00018 и проектом МЦФПМ № 25 -09.

## **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, произведен обзор существующих методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния материалов под действием различных нагрузок, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, описаны методы исследования и его научная новизна, обоснована достоверность полученных результатов, описана практическая значимость работы и приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** сформулирована комплексная математическая модель газодинамических и упругопластических волновых процессов в твердом деформируемом материале.

Исходная система уравнений, описывающая термомеханические эффекты в объекте, подвергающемся воздействию интенсивного потока энергии,

основана на моделях механики сплошной среды<sup>34</sup>. Полная система уравнений включает уравнения и определяющие соотношения (кинематические, физические), описывающие гидрогазодинамику испаряемого материала, упругие и пластические волны, вязкопластические деформации и разрушение в твердом остатке мишени. Динамические процессы в материале объекта в широком диапазоне параметров состояния моделируются в приближении локального термодинамического равновесия.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla(\rho \vec{w}) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \rho w_i + \sum_k \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho w_i w_k + P \delta_{ik}) & \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho E + \frac{1}{2} \rho \vec{w}^2 \right) + \nabla \left( (\rho E + \frac{1}{2} \rho \vec{w}^2 + P) \vec{w} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Система уравнений, используемая для расчета волновых процессов в деформируемом твердом теле, соответствует модели упругопластических деформаций:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_i}{\partial t} &= F_i + \nabla_j \sigma_{ij}; \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} &= \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} + \nabla(\chi \nabla T); \\ \dot{s}_{ij} + 2G \dot{\lambda} s_{ij} &= 2G \left( \dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta_{ij} \right) - 3\alpha K (T - T_0) \delta_{ij}; \\ \dot{s}_{ij} &= \frac{\partial s_{ij}}{\partial t} + s_{ik} W_{kj} - W_{ik} s_{kj}; \quad W_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i w_j - \nabla_j w_i); \\ \sigma_{ij} &= -\nabla_i P + s_{ij} + ((3\eta - 2\mu) \dot{\varepsilon}_{ij} + 2\mu \dot{\varepsilon}_{ij}); \\ \dot{\varepsilon}_{ij} &= \frac{1}{2} (\nabla_i w_j + \nabla_j w_i); \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ij} \delta_{ij} / 3; \\ \dot{\lambda} &= \frac{3}{2Y_0^2} \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(pl)} \\ \delta_{ij} &= \begin{cases} 1, & \text{при } i = j, \\ 0, & \text{при } i \neq j. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

В системе (1) – (2) используются следующие обозначения:  $t$  – время,  $\rho$  – плотность,  $\vec{w} = (w_x, w_y, w_z)^T$  – скорость,  $E$  – удельная внутренняя энергия,

<sup>3</sup> Куропатенко В. Ф. Модели механики сплошных сред – Челябинск: Челяб. гос. ун-т, 2007. – 303с.

<sup>4</sup> Седов Л. И. Механика сплошной среды. – 2 изд. – М.:Наука, 1973. – Т. 1–2.

$P$  – давление,  $T$  – температура,  $\sigma$  – тензор напряжений,  $s$  – девиатор тензора напряжений  $\dot{\epsilon}$  – тензор скоростей деформаций,  $\dot{\lambda}$  – удельная мощность пластической деформации,  $\vec{F}$  – вектор внешних сил,  $\chi$  – коэффициент теплопроводности,  $G$  – модуль сдвига,  $\eta$  и  $\mu$  – упругие постоянные Ламэ,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения,  $K$  – модуль объемного сжатия,  $Y_0$  – предел текучести. Уравнение для девиатора напряжений записано через производную Яумана  $\overset{\circ}{s}_{ij}$  с тем, чтобы учесть отсутствие напряжений при поворотах тела как целого.

Система законов сохранения (1) – (2) должна быть дополнена граничными и начальными условиями, определяющими конкретную постановку задачи, а также уравнениями состояния (УРС) и реологическими соотношениями, которые содержат информацию о свойствах конкретного вещества. При ударном сжатии или импульсном нагреве материала ионизирующим излучением возникают высокие концентрации энергии. Они приводят к перестройке кристаллической структуры вещества, плавлению, испарению, диссоциации и ионизации. Возникает необходимость моделировать свойства вещества в широком диапазоне изменения давления, плотности и температуры. При построении широкодиапазонных УРС необходимо использовать различные модели, имеющие существенно разные области применимости. Выбор адекватных материальных уравнений является одним из важных факторов, определяющих точность газодинамических и упругопластических расчетов.

Во **второй главе** представлено описание разработанного алгоритма сквозного расчета нагрева, испарения, динамики испаренного вещества и упругопластических волновых процессов, приводящих к разрушениям в неиспаренном твердом материале. Алгоритм основан на динамическом контроле изменения агрегатного состояния конденсированной среды с выбором соответствующего УРС и формы тензора напряжений.

Перед началом испытаний (а также соответствующего расчета) исследуемый образец находится, как правило, в твердотельном состоянии при нормальных условиях. Его моделирование необходимо выполнять на основе системы (1) – (2) с полным тензором напряжений.

При интенсивном воздействии на мишень энергия частично или полностью поглощается в образце, материал вследствие возгонки мгновенно переходит в газообразное состояние, минуя жидкую фазу, происходит абляция части материала с поверхности образца. Это явление имеет место, когда удельная внутренняя энергия  $E$  материала становится больше либо равна его энергии абляции  $Q_s$ . Таким образом определяется область, которая переходит в газообразное состояние. В этой области следует учитывать только гидростатическое давление.

При этом в образце в результате действия реактивных сил возникает волна сжатия. Вслед за волной сжатия формируется волна разрежения. Оценивая амплитуду волны разрежения, можно определить области разрушения материала.

Переход материала из упругого в пластичное состояние определяется по критерию Мизеса:

$$\sigma_{eq} = Y_0.$$

Здесь  $\sigma_{eq}$  – эквивалентное напряжение,  $Y_0$  – предел текучести.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3/2} \sqrt{2J_2}$$

$J_2$  – второй инвариант тензора напряжений ( $s_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений):

$$2J_2 = (s_{xx})^2 + (s_{yy})^2 + (s_{zz})^2 + 2[(s_{xy})^2 + (s_{yz})^2 + (s_{zx})^2].$$

В пластической области помимо упругих компонент девиатора напряжений следует учитывать также пластические деформации.

При расчете напряженно-деформированного состояния материала необходимо выделять области объемного разрушения, которые работают исключительно на сжатие. В данной работе использовались следующие критерии, определяющие условия перехода материала в состояние разрушения.

*Критерий максимального напряжения.* Критерий максимального напряжения рассчитывается как максимальное отношение фактических напряжений к предельным напряжениям  $\sigma_{ij}^c$ , определенным в системе координат материала слоя. Критериальная функция прочности записывается в виде

$$\left( \left| \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{xx}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{yy}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{zz}}{\sigma_{zz}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xy}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{xz}}{\sigma_{xz}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{yz}}{\sigma_{yz}^c} \right| \right)_{\max} \leq 1.$$

*Квадратичный критерий Мизеса — Хилла.* Для моделирования разрушения композиционных материалов используется анизотропный квадратичный критерий

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + H(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})^2 + L\sigma_{xy}^2 + M\sigma_{xz}^2 + N\sigma_{yz}^2 \leq 1;$$

$$F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{(\sigma_{yy}^c)^2} + \frac{1}{(\sigma_{zz}^c)^2} - \frac{1}{(\sigma_{xx}^c)^2} \right); \quad G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{(\sigma_{xx}^c)^2} + \frac{1}{(\sigma_{zz}^c)^2} - \frac{1}{(\sigma_{yy}^c)^2} \right);$$

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{(\sigma_{xx}^c)^2} + \frac{1}{(\sigma_{yy}^c)^2} - \frac{1}{(\sigma_{zz}^c)^2} \right); \quad L = \frac{1}{(\tau_{xy}^c)^2}; \quad M = \frac{1}{(\tau_{xz}^c)^2}; \quad N = \frac{1}{(\tau_{yz}^c)^2}.$$

Здесь  $\tau_{ij}^c$  – пороги разрушения при сдвиговом нагружении.

*Интегральный критерий Тулера — Бутчера.* Более полное и детальное описание процесса разрушения в композиционных материалах достигается, если рассматривать его как событие, протекающее во времени. В качестве критерия, учитывающего время действия напряжения, используется интеграл повреждений Тулера-Бучера

$$D = \int_0^t (\sigma_0 - \sigma(t))^\lambda dt$$

Здесь  $\sigma(t)$  – напряжение разрушения,  $\sigma_0$  – максимальное главное напряжение,  $\lambda$  – постоянная материала,  $t$  – время, когда происходит разрушение,  $D$  – интеграл разрушения (материальная постоянная).

Введем индикатор состояния материала – целочисленную переменную  $\Psi$ :

$$\Psi = \begin{cases} 0, & \text{при } E \geq Q_s; \\ 1, & \text{при } E < Q_s \text{ и } \sigma_{ij} < \Sigma_l \text{ и } \sigma_{eq} < Y_0; \\ 2, & \text{при } E < Q_s \text{ и } \sigma_{ij} < \Sigma_l \text{ и } \sigma_{eq} = Y_0 \\ 3, & \text{при } E < Q_s \text{ и } \sigma_{ij} \in \mathbf{Z}. \end{cases}$$

Здесь  $E$  – удельная внутренняя энергия,  $Q_s$  – энергия абляции,  $\sigma_{ij}$  – компонента напряжений напряжений,  $\Sigma_l$  – критическое напряжение,  $\mathbf{Z}$  – разрушенная область.

Если индикатор состояния равен 0, среда газообразная, 1 – упругая, 2 – упругопластическая, 3 – область разрушения. Описать поведение среды в зависимости от значения индикатора состояния можно следующим образом:

$$\sigma_{ij}(\Psi) = \begin{cases} \sigma_{ij}(0) = \sigma_{tr} \delta_{ij} \\ \sigma_{ij}(1) = s_{ij} + \sigma_{tr} \delta_{ij}, \Delta s_{ij} = \Delta s_{ij}^{(e)} \\ \sigma_{ij}(2) = s_{ij} + \sigma_{tr} \delta_{ij}, \Delta s_{ij} = \Delta s_{ij}^{(e)} - 2G\lambda s_{ij} \\ \sigma_{ij}(3) = \sigma_{tr} \delta_{ij}, \sigma_{tr} \leq 0 \end{cases}$$

$s_{ij}$  – тензор девиатора напряжений,  $\sigma_{tr} = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$  – гидростатическое давление,  $\Delta s_{ij}^{(e)}$  – приращение упругих компонент девиатора напряжений,  $G$  – модуль сдвига,  $\lambda = \frac{3}{2Y_0^2} (s_{11}\dot{\epsilon}_{11}^{(p)} + s_{22}\dot{\epsilon}_{22}^{(p)} + s_{33}\dot{\epsilon}_{33}^{(p)})$  – удельная мощность пластической деформации.

При расширении модели могут быть введены дополнительные значения переменной  $\Psi$ , соответствующие новым состояниям материала, включаемым в модель.

Для определения термодинамических параметров среды при достаточно высокой скорости изменения ее структуры важен учет неравновесности при фазовых переходах или при изменении агрегатного состояния материала. Для вещества в газообразном, жидком, пластическом или разрушенном состоянии используется "равновесное" УРС (рассчитывается равновесие фаз из условия выполнения правила Максвелла для давления насыщенного газа), при этом в твердотельной части образца учитываются фазовые переходы и двухфазные состояния. Здесь используется "неравновесное" УРС в табличной или аналитической форме, Максвелловская конструкция не применяется.

$$P(\rho, T, \Psi) = \begin{cases} \Psi = 0 - \text{равновесное УРС}; \\ \Psi = 1 - \text{неравновесное УРС}; \\ \Psi = 2 - \text{равновесное УРС}; \\ \Psi = 3 - \text{равновесное УРС}. \end{cases} \quad (3)$$

При этом для газообразной среды используется табличное полуэмпирическое УРС, а для конденсированных сред – аналитическое УРС. Критерий перехода:

$$P(\rho, T, \Psi) = \begin{cases} \Psi = 0 - \text{табличное УРС, } E \geq Q_s; \\ \Psi = 1, 2, 3 - \text{аналитическое УРС, } E < Q_s. \end{cases} \quad (4)$$

В общем случае система (1) – (2) может описывать динамику многокомпонентной смеси, например, образца, состоящего из нескольких материалов.

Будем считать, что смесь состоит из  $N$  компонент,  $\alpha_n$  – массовая концентрация  $n$ -й компоненты (отношение массы  $n$ -й компоненты к полной массе смеси),  $\rho_n$  – плотность  $n$ -й компоненты,  $n = 1 \div N$ .

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n = 1, \quad \sum_{n=1}^N \rho_n = \rho, \quad \rho_n = \alpha_n \rho.$$

Для каждой компоненты смеси решается отдельное уравнение неразрывности, но уравнения импульса и энергии общие для всей смеси. Между компонентами имеет место механическое ( $\vec{W}_n = \vec{W}$ ) и термодинамическое ( $T_n = T$ ) равновесие.

Для смеси газов используется модель взаимопроникающих компонент, где в любом макроскопическом объеме присутствуют все компоненты в соотношении, определяемом массовыми концентрациями, каждая из компонент заполняет объем, совершенно не испытывая влияния других компонент, находящихся в том же объеме.

Зная плотности компонент  $\rho_n$  и УРС  $P_n = P_n(\rho_n, T)$  и  $E_n = E_n(\rho_n, T)$  для каждой из них, можно найти полное давление и полную внутреннюю энергию смеси.

$$P(\alpha_1, \dots, \alpha_N, \rho, T) = \sum_{n=1}^N P_n(\rho_n, T), \quad E(\alpha_1, \dots, \alpha_N, \rho, T) = \sum_{n=1}^N \alpha_n E_n(\rho_n, T).$$

Сеточная реализация данной модели в программном комплексе MARPLE, которая использовалась в настоящей работе, предполагает, что 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. В рамках такого подхода оказывается возможным моделировать многофазные среды, представляя различные состояния одного и того же вещества как отдельные компоненты. Переход из одного состояния в другое (изменение значения переменной  $\Psi$ ) отслеживается на основании описанных выше критериев, которые применяются к расчетной ячейке в целом. Выбор УРС осуществляется для каждой компоненты в соответствии с условиями (3) – (4).

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма сквозного расчета.

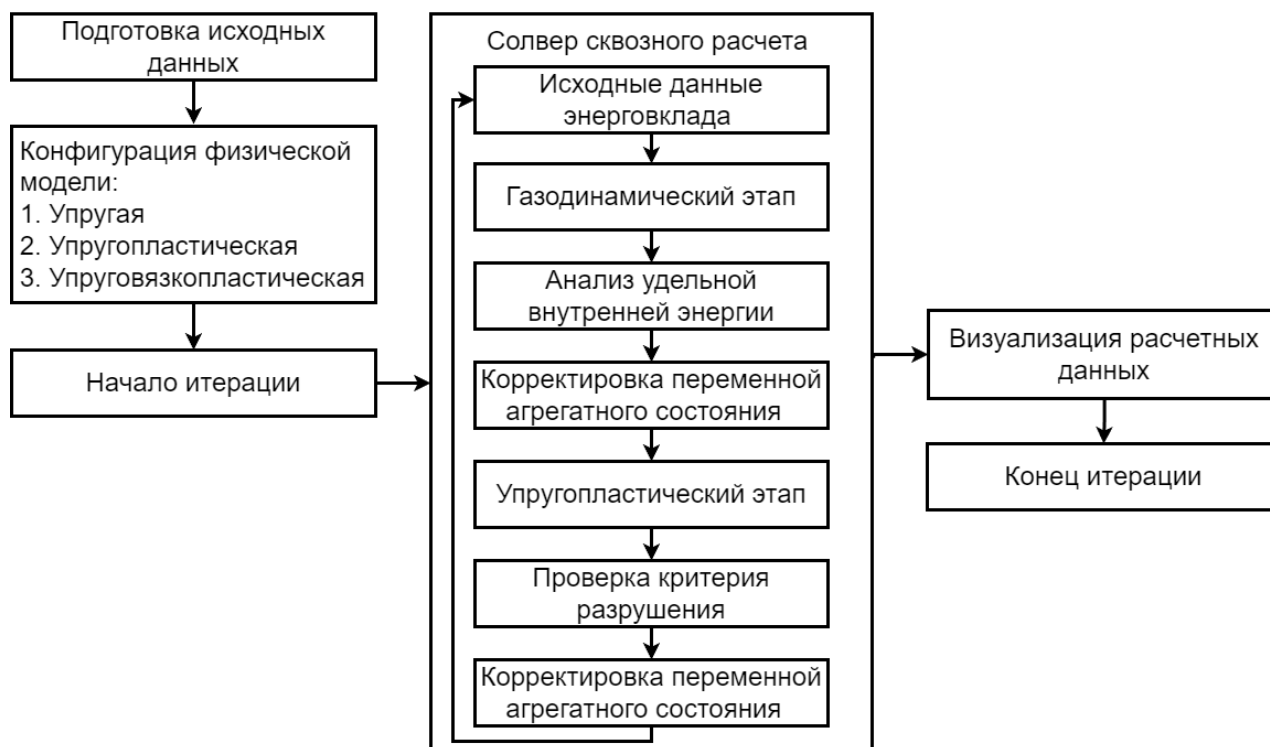


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма сквозного расчета

**Третья глава** посвящена описанию реализации алгоритма сквозного расчета в программном комплексе MARPLE. MARPLE представляет собой расширяемую вычислительную платформу, позволяющую проводить многоцелевые численные эксперименты. В результате выполнения диссертационной работы в код были инкорпорированы новые программные модули, осуществляющие решение системы уравнений (1) – (2) в декартовых координатах в полной трехмерной постановке согласно алгоритму рис.1.

Процедура интегрирования по времени, применяемая в коде MARPLE, реализует принцип суммарной аппроксимации основной системы уравнений (1) – (2). Данный принцип делает возможным построение универсального алгоритма продвижения по времени, допускающего независимый расчет всех уравнений, включенных в основную систему. Более того, алгоритм допускает использование явных или неявных аппроксимаций по времени в зависимости от типа конкретного рассматриваемого члена уравнения, представляющего определенный физический процесс. Таким образом, для компонент, соответствующих гиперболической подсистеме из общей системы уравнений, применяется явная аппроксимация, в то время как для компонент, соответствующих параболической/эллиптической подсистемам применяются неявные схемы. Решение уравнений гидродинамики-упругопластики по всей области испаренного и неиспаренного материала выполняется по явным разностным схемам, форма тензора напряжений выбирается в зависимости от агрегатного состояния вещества, которое предварительно анализируется.

Расчёт газодинамических волн в испаренном материале и динамических процессов в области упругопластического материала выполняется на основе

разностной схемы повышенного порядка аппроксимации, построенной на неструктурированной сетке общего вида путем модификации известной схемы Лакса-Фридрихса. Интегрирование по времени осуществляется по схеме предиктор-корректор. Этот метод обладает достаточным уровнем разрешения волновых структур по пространству и времени при умеренных затратах вычислительных ресурсов. В целом разработанная методика воспроизводит процессы взаимодействия прямых и отражённых волн с учетом различного рода граничных и контактных условий. При использовании релевантных реологических моделей и критериев разрушения методика позволяет корректно моделировать разрушение материала и волновой отклик от разрушенных областей.

Код создан методами объектно-ориентированного и обобщенного программирования на базе языка C++. Инфраструктура MARPLE поддерживает работу на всех этапах параллельного решения начально-краевых задач математической физики, от ввода данных до обработки результатов расчетов. Благодаря этому оказалось возможным расширить область приложений кода на задачи воздействия интенсивных потоков энергии на твердые материалы, используемые в инженерной практике. Решатель сквозного типа интегрирован в вычислительную платформу MARPLE и использует весь доступный функционал.

Солвер совместного расчета газо/гидродинамики с упругопластической моделью сконструирован с учетом возможностей высокопроизводительных вычислительных систем распределенного типа. Расчетная область (содержащая несколько физических областей) разбивается на вычислительные субдомены, которые обрабатываются в параллельном режиме. Расчет в каждом вычислительном субдомene выполняется обособленно, для обмена всеми необходимыми данными между отдельными субдоменами используется с технологией OpenMPI.

В коде MARPLE реализованы вычислительные технологии на основе блочных структурированных и неструктурированных сеток, состоящих из тетраэдральных, гексаэдральных, призматических элементов и их комбинаций.

Подготовка расчетных областей с нетривиальной геометрией обеспечивается средствами импорта данных из интегрированной CAD-CAE системы с открытым исходным кодом SALOME<sup>5</sup>.

Вычислительное ядро кода, а также средства пред- и постобработки данных работают в общей вычислительной среде с развитой инфраструктурой и адаптированной к параллельным вычислениям унифицированной системой данных, аналогичной применяемым в промышленных конечно-элементных кодах.

Рассмотрены актуальные направления развития суперкомпьютерных и кластерных вычислителей и обсуждены существующие подходы организации разделения вычислительных ресурсов. Описана клиент-серверная архитектура

---

<sup>5</sup> <https://www.salome-platform.org/>

цифровой платформы для проведения полного цикла вычислительного эксперимента. Вычислительная платформа MARPLE интегрирована в цифровую платформу для решения сложных мультифизических задач KIAM Digital Tool. Разработана необходимая для этого утилита преобразования конфигурационных данных. Спроектирован и реализован графический пользовательский интерфейс расчетных кодов, предоставлены и документированы типичные сценарии использования цифровой платформы для каждого из типов пользовательского аккаунта.

**Четвертая глава** содержит описание вспомогательного программного модуля для решения одномерных и многомерных задач упругопластики в лагранжевых (массовых) координатах. Данный модуль предназначен для тестирования УРС и критериев разрушения, а также может быть использован для практических расчетов в задачах, обладающих соответствующей симметрией. Лагранжев подход обеспечивает точное отслеживание границ материалов в многоматериальных конструкциях. В модуле реализованы известные апробированные методики, характеризующиеся высокой точностью и надежностью. В рамках диссертационной работы сравнительное моделирование по независимым эйлеровой и лагранжевой методикам используется в тех случаях, когда для обоснования достоверности численных результатов сопоставление с теоретическими оценками и экспериментальными данными целесообразно подкрепить дополнительными вычислительными экспериментами. Лагранжев модуль позволил провести тестирования описанного в третьей главе солвера сквозного расчета с использованием одинаковых моделей УРС, таблиц данных, критериев разрушения и других исходных данных.

Реализован численный метод с использованием структурированных расчётных сеток для моделирования сложных волновых процессов, происходящих в многослойных конструкциях. Метод обладает возможностью определения области разрушения в результате воздействия различных динамических нагрузок, а также расчёта откликов разрушенных областей.

Выполнено моделирование упругопластических течений, возникающих под действием удара.

В результате проведённого сравнительного анализа 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 объёмного разрушения. Это согласование служит весомым доказательством корректности реализации численных алгоритмов, адекватности выбранных математических моделей и надёжности получаемых результатов.

Таким образом, проведённое исследование не только подтверждает работоспособность разработанных программных модулей, но и вносит вклад в общую методологию верификации численных моделей в области динамики деформируемых сред. Полученные результаты могут быть использованы в качестве эталонных при тестировании новых алгоритмов, а также при

разработке гибридных схем, сочетающих преимущества обоих подходов.

**Пятая глава** 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»<sup>6</sup>, генерирующем релятивистские электронные пучки (РЭП) с амплитудой тока до 45 кА при энергии электронов до 300 кэВ и полном флюенсе энергии на мишень до 1 кДж/см<sup>2</sup>. Длительность импульса составляет 100-200 нс. В результате поглощения электронов в конденсированном веществе происходит нагрев и испарение части материала, на неиспаренную часть образца действует импульс отдачи, инициирующий волновые процессы, которые могут привести к разрушению образца. Энерговклад электронного пучка учитывался в форме источника в уравнении баланса энергии. Импульс отдачи летящего испаренного материала непосредственно вычислялся в сквозном расчете напряженно-деформированного состояния в неиспарившемся остатке образца.

В разделе 5.1 представлены результаты моделирования воздействия РЭП на образец из эпоксидной смолы – цилиндр диаметром 35 мм и высотой 20 мм. Флюенс энергии 600 Дж/см<sup>2</sup>, поток электронов на мишень однородный по радиусу, имеет диаметр 1 см, время воздействия 0.1 мкс, время расчета 5 мкс.

Распределение энерговыделения по глубине образца перпендикулярно облучаемой поверхности моделировалось экспоненциальной зависимостью с эффективной глубиной поглощения  $L_{0.95}=0.6$  мм согласно экспериментальным данным, приведенным в статье<sup>7</sup>.

Расчетная область включала исследуемый образец и фоновую разреженную среду (модельный лабораторный вакуум), в которой распространяется испаренный с облучаемой поверхности материал, см. рис. 3. Моделирование выполнялось с широкодиапазонными уравнениями состояния на основе полуэмпирической модели QEOS для описания жидкой и твердой фазы вещества при низких температурах<sup>8</sup>.

---

<sup>6</sup> Gurevich M. I., Kazakov E. D., Kalinin Yu. G., Kurilo A. A., Tel'kovskaya O. V., Chukbar K. V. On the Destruction of Elastic Polymers under Electron Beam Irradiation // Technical Physics, 2022, Vol. 67, No. 7, pp. 581–587. DOI: 10.1134/S1063784222080047

<sup>7</sup> Демидов Б.А., Ефремов В.П., Ивкин М.В., Петров В.А., Мещеряков А.Н. Динамика процесса взаимодействия сильноточного импульсного электронного пучка с полимерными материалами // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2008, № 8, с.55-60.

<sup>8</sup> Faik S. , Tauschwitz A. , Iosilevskiy I. The equation of state package FEOS for high energy density matter // Computer Physics Communications Volume 227, June 2018, Pages 117-125 <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.01.008>.

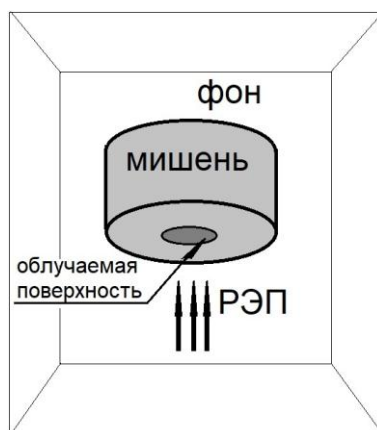


Рисунок 3. Схема вычислительного эксперимента и расчетной области

В результате расчета с использованием критериев разрушения по главному напряжению были выявлены наблюдаемые в эксперименте характерные области разрушения материала: испаренная каверна на облучаемой поверхности, внутреннее объемное разрушение и тыльный откол, см. рис. 4.

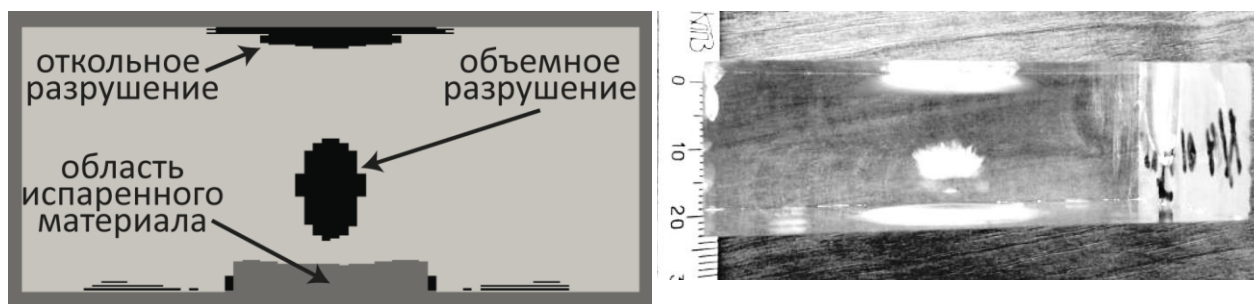


Рисунок 4. Слева – переменная агрегатного состояния на момент окончания расчета: светло серый –  $\Psi=1$  упругопластическая область неразрушенного материала, черный –  $\Psi=3$  упругопластическая область разрушенного материала, темно серый –  $\Psi=0$  газодинамическая область (испаренный материал и фон). Справа – фотография экспериментального образца после облучения.

Исследование образцов из эпоксидной смолы представляет большой практический интерес, поскольку она является основой многих композиционных материалов, в частности углепластиков, которые широко применяются в различных отраслях промышленности. На основании расчетов была оценена скорость разлета плазмы с облучаемой поверхности, масса испаренного вещества и импульс механического давления в образце. Сопоставление этих параметров с экспериментальными данными использовалось для калибровки широкодиапазонных УРС.

В разделе 5.2 представлены результаты моделирования воздействия РЭП на многослойную конструкцию, изображенную на рис. 5. Мишень состоит из трех слоев: свинец – толщина 0,03 см, углепластик – 0,07 см, эпоксидная смола – 0,4 см. Объект находится в лабораторном вакууме. Параметры воздействующей нагрузки: флюенс энергии 750 Дж/см<sup>2</sup>, время воздействия 100 нс, время расчета 3 мкс.

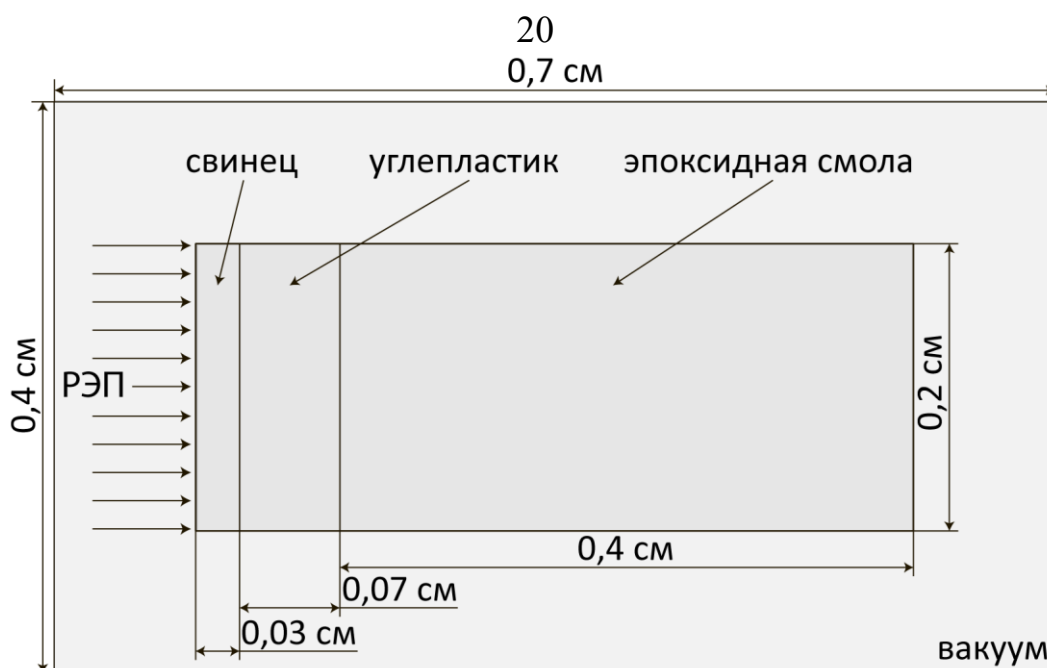


Рисунок 5. Схема вычислительного эксперимента и расчетной области.

Энерговклад РЭП приводит к испарению части материала и возникновению в мишени импульса давления. В мишени распространяется ударная волна, после ее взаимодействия со свободной поверхностью формируется волна разрежения, полностью разгружающая материал. В процессе взаимодействия волны разрежения с границами раздела материалов от этих границ распространяются волны разрежения и сжатия. Когда давление растяжения достигает значения, превышающего предел прочности на разрыв, происходит откол. Продемонстрированный подход может применяться для микромеханического анализа слоистых композитов на основе углепластиков.

**Раздел 5.3** посвящен моделированию 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<sup>9</sup>.

Непосредственное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) сферопластика – достаточно трудоемкая вычислительная задача. Плотность расположения сферических включений в связующем весьма высокая, в 1 мм<sup>3</sup> композиционного материала содержится ~10<sup>3</sup> сферических

<sup>9</sup> Милехин Ю.М., Садовничий Д.Н., Шереметьев К.Ю., Калинин Ю.Г., Казаков Е.Д., Марков М.Б. Формирование нановискеров наносекундным потоком релятивистских электронов в сферопластике, содержащем вольфрам // Доклады академии наук. 2019. Т. 487. № 2. С. 159-163. Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М., Казаков Е.Д., Марков М.Б., Шереметьев К.Ю. Процессы структурообразования в синтактной пене на основе металлизированных стеклосфер и полисилоксана при воздействии пучка релятивистских электронов с наносекундным фронтом импульса // Известия Академии наук. Серия химическая. 2023. Т. 72. № 9. С. 2048-2059.

включений. Реалистичным выглядит подход, в котором на первом этапе необходимо провести расчет НДС для отдельного сферического элемента, нагруженного волной давления. Такой расчет позволяет определить условия разрушения микросферы. Следующий этап заключается в моделировании образца гетерогенного материала, в котором свойства наполнителя получены из предыдущего расчета. После этого возможно проделать процедуру осреднения свойств гетерогенного материала.

Было проведено моделирование элементарной ячейки композита, учитывающее упругие свойства и объемные содержания компонентов. Объектом исследования является многослойная сферическая структура (см. рис. 6). Внешний слой – связующее из эпоксидной смолы толщиной 7,35 мкм, промежуточный слой – вольфрам толщиной 0,15 мкм, внутренний слой – стекло толщиной 2,50 мкм. В центре сферической конструкции находится область вакуума радиусом 10,00 мкм. В качестве нагрузки на границе задавалось распределение термодинамических параметров при падении плоской ударной волны (УВ) на сферическую поверхность. Расчет проводился на гибридной сетке, состоящей из тетраэдров и призм, количество сеточных элементов  $7,4 \cdot 10^6$ .

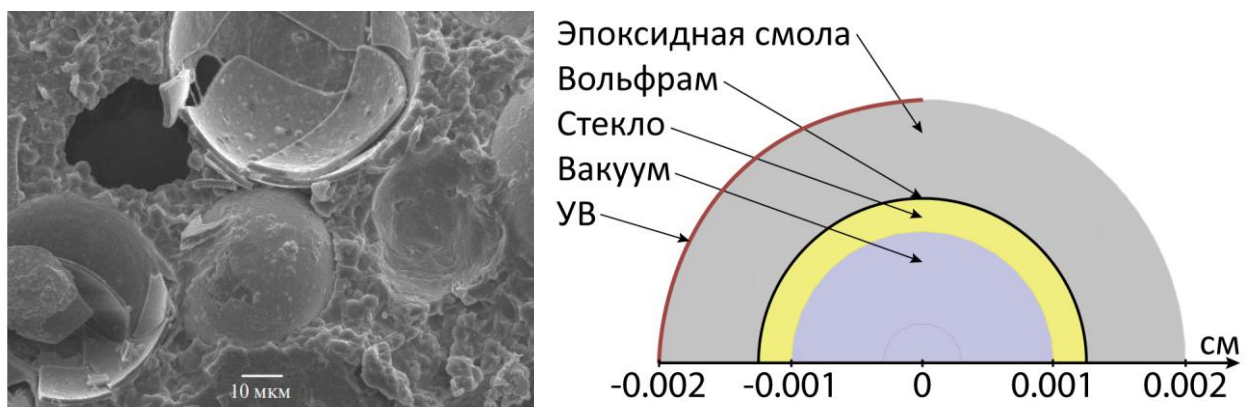


Рисунок 6. Слева – типовая микрофотография объёма сферопластика после воздействия РЭП. Справа – геометрическая модель микросферы.

В результате воздействия в объекте формируется квазисферическая ударная волна с максимальной амплитудой давления 21 ГПа в точке торможения. Действие ударной нагрузки на сферическую элементарную ячейку приводит к тому, что в вольфрамовом покрытии возникают неоднородные структуры. На момент времени 0.003 мкс эти структуры приобретают продолговатую форму. Внутренние оболочки из вольфрама и стекла разрушены. Часть смеси стекла, вольфрама и эпоксидной смолы находится в пластичном состоянии и сжимается в области вакуума к центру сферической конструкции. Материалы, изначально находившиеся в элементарной ячейке, образуют смесь, которая занимает ~70% внутренней полости, что свидетельствует о высокой степени сжатия и перемешивания вещества. Смесь остывает до твердотельной температуры 900К за ~82 мкс, что указывает на высокую скорость теплопередачи и затвердевания. Изучение

процесса взаимодействия ударных волн при коллапсе микросферы, содержащей вольфрам, в полимерной матрице позволило установить, что вольфрам, благодаря своим уникальным свойствам (высокая плотность, тугоплавкость и прочность), существенно влияет на устойчивость сфероэластика к деформации и разрушению. Взаимодействие ударных волн с материалом приводит к сложным процессам на микро- и наноуровне, включая локальное нагревание, пластическую деформацию и фазовые превращения. Коллапс микросфер сопровождается повышением температуры до  $T_{\max} = 7000\text{K}$ , плотность в коллапсирующем объеме достигает  $26\text{ г/см}^3$ , а скорость деформации вещества  $1.54\text{ мкс}^{-1}$ . Анализ процесса разрушения элементарной ячейки сфероэластика выявил ключевые механизмы деформации материала под действием ударных волн. Установлено, что действующее на микросферу давление неоднородно по ее поверхности и способно приводить к фрагментации материала. Определены начальные условия для формирования нитевидных структур в вольфрамсодержащем сфероэластике. Моделирование неравномерной нагрузки успешно позволило воспроизвести условия, приближенные к реальному расположению сферического элемента внутри гетерогенного материала. Это подтверждает адекватность выбранной модели для анализа поведения материалов в сложных условиях.

На рис. 7 показана схема проведения численных исследований макроскопического образца синтактной пены. Дисперсный наполнитель имеет сферическую форму диаметром  $d = 50\text{ мкм}$ . Массовая доля микросфер 28%, распределение наполнителя стохастическое, равномерно по объему связующего из эпоксидной смолы. Образец окружен с фронтальной и тыльной стороны фоновой разреженной средой. Мишень подвергается воздействию РЭП (флюенс энергии  $240\text{ Дж/см}^2$ , длительность  $100\text{ нс}$ ). Время расчета  $0.5\text{ мкс}$ . Энерговклад в материал был рассчитан с помощью программы для моделирования переноса излучения в гетерогенных материалах, разработанной в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН<sup>10</sup>.

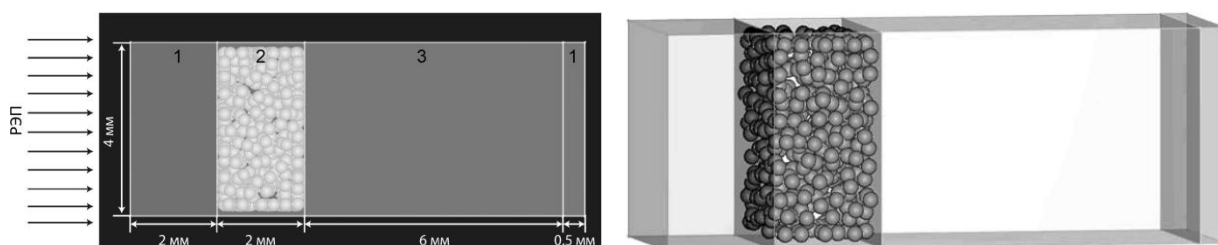


Рисунок 7. Схема эксперимента и модель гетерогенного материала.  
1 – фон, 2 – гетерогенный материал, 3 – подложка.

<sup>10</sup> Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Программа математического моделирования каскадных процессов переноса излучения в гетерогенных материалах сложной геометрической структуры на гибридных вычислительных кластерах / Марков М.Б., Егорова В.А., Жуковский М.Е., Потапенко А.И., Усков Р.В. RU 2019612948, 05.03.2019. Заявка № 2019611865 от 26.02.2019.

В результате воздействия РЭП происходит абляция материала. Стохастически распределенный дисперсный наполнитель поглощает больше энергии, чем при структурированном размещении наполнителя. Разрушения образца происходят в еще не испаренном дисперсном наполнителе и в подложке там, где поглотилось больше энергии из-за стохастического размещения наполнителя. При абляции материала возникают реактивные силы, которые формируют импульс отдачи. На момент времени 0.3 мкс в расчете хорошо видно, как акустическая волна распространяется в подложке. В сублимированном дисперсном наполнителе возникают деформации, приводящие к частичному разрушению наполнителя до момента абляции. Концентрация напряжений происходит в дисперсном наполнителе, в его приповерхностных слоях, где поглощается больше энергии.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Разработана комплексная компьютерная модель термомеханических явлений в твердом деформируемом материале в результате действия интенсивных потоков энергии.
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.
3. Создана 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) и библиотеки OpenMPI в виде предметно-ориентированной версии кода, включенной в состав вычислительной платформы MARPLE. Вычислительная платформа MARPLE интегрирована в цифровую платформу для решения сложных мультифизических задач KIAM Digital Tool.
4. Проведены вычислительные эксперименты с целью изучения разрушения полимерных и композиционных материалов под действием ионизирующих излучений, получены оценки прочностных свойств исследованных материалов.

Созданные в результате диссертационной работы компьютерная модель, вычислительный алгоритм и программное обеспечение могут быть использованы при анализе результатов интенсивных энергетических воздействий в инженерной практике, верификации моделей объемных разрушений и отколов в хрупких материалах, а также валидации широкодиапазонных уравнений состояния.

## Публикации автора по теме диссертации

1. **Бойков Д.С.**, Тарасов Н.И., Болдарев А.С., Кондратьев К.С. интеграция вычислительной платформы marple в цифровую платформу KIAM Digital Tool для решения задач мультифизики // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2025. № 45. С. 1-26. (**перечень ВАК, РИНЦ**)
2. Марков М.Б., Садовничий Д.Н., Ольховская О.Г., **Бойков Д.С.**, Гасилов В.А., Поляков С.В., Грушин А.С. Динамика микросферы с двухслойной оболочкой в полимерном связующем при действии ударной волны // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2025. № 26. С. 1-19. (**перечень ВАК, РИНЦ**)
3. **Бойков Д. С.** Сквозной расчет термомеханических процессов в твердом теле с динамическим контролем агрегатного состояния // Математическое моделирование. 2024. Т. 36. № 4. С. 166-182. (**перечень ВАК, Scopus**) DOI: [10.20948/mm-2024-04-11](https://doi.org/10.20948/mm-2024-04-11)
4. Gasilov V.A., Boldarev A.S., Olkhovskaya O.G., **Boikov D.S.**, Sharova Yu.S., Savenko N.O., Kotelnikov A.M. MARPLE: software for multiphysics modelling in continuous media // Numerical Methods and Programming. 2023. Т. 24. № 4. С. 316-338. (**перечень ВАК, ядро РИНЦ**) DOI: [10.26089/NumMet.v24r423](https://doi.org/10.26089/NumMet.v24r423)
5. Гасилов В. А., Болдарев А. С., Ольховская О. Г., **Бойков Д. С.**, Шарова Ю. С., Савенко Н. О., Котельников А. М. MARPLE: программное обеспечение для мультифизического моделирования в задачах сплошных сред // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2023. № 37. С. 1-40. (**перечень ВАК, РИНЦ**) DOI: [10.20948/prepr-2023-37](https://doi.org/10.20948/prepr-2023-37)
6. **Бойков Д. С.** Сквозной расчет термомеханических явлений в твердом теле с динамическим контролем агрегатного состояния // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2023. № 56. С. 1-18. (**перечень ВАК, РИНЦ**) DOI: [10.20948/prepr-2023-56](https://doi.org/10.20948/prepr-2023-56)
7. Повещенко Ю. А., Круковский А. Ю., Подрыга В. О., Рагимли П. И. К., **Бойков Д. С.** Численное моделирование пространственных задач гидродинамики с учетом упругих процессов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2023. № 7. С. 1-16. (**перечень ВАК, РИНЦ**) DOI: [10.20948/prepr-2023-7](https://doi.org/10.20948/prepr-2023-7)
8. Olkhovskaya O., **Boikov D.**, Gasilov V., Kazakov E., Tkachenko S., Smirnova A. Study of processes in polymer targets under high-energy exposure // В сборнике: Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Congress Proceedings. Edited by Dr. Dmitry Sorokin and Anton Grishkov. Tomsk, 2022. С. 166-171. (**РИНЦ**) DOI: [10.56761/EFRE2022.S2-O-046201](https://doi.org/10.56761/EFRE2022.S2-O-046201)
9. **Бойков Д. С.**, Ольховская О. Г., Гасилов В. А. Моделирование газодинамических и упругопластических явлений при интенсивном энерговыделении в твердый материал // Математическое моделирование. 2021. Т. 33. № 12. С. 82-102. (**перечень ВАК, Scopus**)

DOI: [10.20948/mm-2021-12-06](https://doi.org/10.20948/mm-2021-12-06)

10. Повещенко Ю. А., Круковский А. Ю., **Бойков Д. С.**, Подрыга В. О., Рагимли П. И. К. Трехмерное моделирование гидродинамических задач с учетом упругих процессов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 30. С. 1-15. (**перечень ВАК, РИНЦ**) DOI: [10.20948/prepr-2021-30](https://doi.org/10.20948/prepr-2021-30)
11. Григорьев С. К., Бай А. А., **Бойков Д. С.**, Багдасаров Г. А., Шарова Ю. С. Технология адаптивного уточнения сетки для задач механики сплошных сред // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 86. С. 1-19. (**перечень ВАК, РИНЦ**) DOI: [10.20948/prepr-2021-86](https://doi.org/10.20948/prepr-2021-86)
12. **Bouykov D.**, Grigoriev S., Olkhovskaya O., Boldarev A. Implementing a mesh-projection schemes using the technology of adaptive mesh refinement // Lecture Notes in Computer Science. 2020. Т. 11958 LNCS. С. 576-583. (**WoS, Scopus**) DOI: [10.1007/978-3-030-41032-2\\_66](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41032-2_66)
13. Егорова В. А., Воронин Ф. Н., Жуковский М. Е., Марков М. Б., Потапенко А. И., Усков Р. В., **Бойков Д. С.** Модель радиационно-индуцированных термомеханических эффектов в гетерогенных мелкодисперсных материалах // Математическое моделирование. 2020. Т. 32. № 1. С. 85-99. (**перечень ВАК, Scopus**) DOI: [10.20948/mm-2020-01-06](https://doi.org/10.20948/mm-2020-01-06)
14. **Бойков Д. С.**, Болдарев А. С., Гасилов В. А. Численный анализ магнитомеханического эффекта в нагревательных трубах. // Математическое моделирование. 2020. Т. 32. № 4. С. 3-15. (**перечень ВАК, Scopus**) DOI: [10.20948/mm-2020-04-01](https://doi.org/10.20948/mm-2020-04-01)
15. Васюков А. В., Петров И. Б., Беклемышева К. А., Якобовский М. В., Повещенко Ю. А., Гасилов В. А., **Бойков Д. С.** Модель и расчет напряженно-деформированного состояния гидратосодержащей среды при ее частичном растеплении // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 99. С. 1-23. (**перечень ВАК, РИНЦ**) DOI: [10.20948/prepr-2020-99](https://doi.org/10.20948/prepr-2020-99)
16. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Повещенко Ю. А., Гасилов В. А., **Бойков Д. С.**, Попов С. Б. Однородные разностные схемы для сопряженных задач гидродинамики и упругости // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2019. Т. 161. № 3. С. 377-392. (**перечень ВАК, WoS, Scopus**) DOI: [10.26907/2541-7746.2019.3.377-392](https://doi.org/10.26907/2541-7746.2019.3.377-392)
17. Повещенко Ю. А., Гасилов В. А., Подрыга В. О., Ладонкина М. Е., Волошин А. С., **Бойков Д. С.**, Беклемышева К. А. Разностные схемы согласованной аппроксимации напряженно-деформированного состояния и энергобаланса среды // Математическое моделирование. 2019. Т. 31. № 7. С. 3-20. (**перечень ВАК, Scopus**) DOI: [10.1134/S0234087919070013](https://doi.org/10.1134/S0234087919070013)
18. Sharova Y. S., **Bouykov D. S.**, Beklemysheva K. A., Vasyukov A. V., Petrov I. B. The fracture of materials under intensive short-time loads. // В сборнике: AIP Conference Proceedings. 45. Сер. "Proceedings of the 45th International Conference on Application of Mathematics in Engineering and Economics, AMEE 2019" 2019. С. 070019. (**WoS, Scopus**) DOI: [10.1063/1.5133555](https://doi.org/10.1063/1.5133555)

19. Рагимли П. И., Повещенко Ю. А., Казакевич Г. И., **Бойков Д. С.**, Гасилова И. В. Модель флюидодинамики в пористой среде, содержащей газогидраты // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 119. С. 1-15. (**перечень ВАК, РИНЦ**) DOI: [10.20948/prepr-2016-119](https://doi.org/10.20948/prepr-2016-119)
20. Гасилов В. А., Круковский А. Ю., Повещенко Ю. А., Цыгвинцев И. П., **Бойков Д. С.** Неявная двухслойная лагранжево-эйлерова разностная схема газовой динамики на основе согласованных аппроксимаций уравнений балансов массы и импульса // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. № 38. С. 1-22. (**перечень ВАК, РИНЦ**)

*Бойков Дмитрий Сергеевич*

Совместное моделирование газодинамических и упругопластических явлений при интенсивном энерговыделении в твердый материал

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук Подписано в печать 25.11.2025. Заказ № А-11.

Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1.5. Тираж 90 экз.

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., 4