



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 26 за 2025 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

М.Б. Марков, Д.Н. Садовничий,
О.Г. Ольховская, Д.С. Бойков,
В.А. Гасилов, С.В. Поляков,
А.С. Грушин

Динамика микросферы с
двухслойной оболочкой в
полимерном связующем при
действии ударной волны

Статья доступна по лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Динамика микросферы с двухслойной оболочкой в полимерном связующем при действии ударной волны / М.Б. Марков [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2025. № 26. 19 с. EDN: [SGKMAB](https://doi.org/10.26907/2071-2898.2025.26)
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2025-26>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

**М.Б. Марков, Д.Н. Садовничий, О.Г. Ольховская,
Д.С. Бойков, В.А. Гасилов, С.В. Поляков, А.С. Грушин**

**Динамика микросферы с двухслойной
оболочкой в полимерном связующем
при действии ударной волны**

Москва — 2025

М.Б. Марков, Д.Н. Садовничий, О.Г. Ольховская, Д.С. Бойков, В.А. Гасилов, С.В. Поляков, А.С. Грушин

Динамика микросферы с двухслойной оболочкой в полимерном связующем при действии ударной волны

В работе исследована динамика микросферы с двухслойной оболочкой, находящейся в полимерном связующем, под действием ударной волны. Рассмотрены механизмы деформации и разрушения оболочки микросферы, а также влияние свойств полимерного матрикса на передачу ударного воздействия. С использованием компьютерных моделей в серии вычислительных экспериментов проанализированы процессы распространения ударной волны через композитный материал, учитывая различия в механических свойствах слоев оболочки и полимерной среды. Показано, что двухслойная структура оболочки способствует эффективному поглощению энергии ударного воздействия и формированию нитевидных структур. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации свойств композитных материалов, применяемых в условиях динамических нагрузок, таких как ударные волны.

Ключевые слова: Динамика микросферы, ударная волна, деформация оболочки, композиционный материал, нитевидные структуры, оптимизация композитных материалов.

M.B. Markov, D.N. Sadovnichii, O.G. Olkhovskaya, D.S. Boykov, V.A. Gasilov, S.V. Polyakov, A.S. Grushin

Dynamics of a Microsphere with a Double-Layered Shell in a Polymer Matrix under the Action of a Shock Wave

The study investigates the dynamics of a microsphere with a double-layered shell embedded in a polymer matrix under the influence of a shock wave. The mechanisms of deformation and failure of the microsphere's shell, as well as the impact of the polymer matrix properties on the transmission of shock loading, are examined. Using computer models in a series of computational experiments, the processes of shock wave propagation through the composite material were analyzed, taking into account the differences in the mechanical properties of the shell layers and the polymer medium. It is demonstrated that the double-layered shell structure facilitates effective energy absorption from the shock impact and the formation of filamentary structures. The results of the study can be applied to optimize the properties of composite materials used under dynamic loading conditions, such as shock waves.

Key words: Microsphere dynamics, shock wave, shell deformation, composite material, filamentary structures, optimization of composite materials.

Введение

Современные технологии открывают новые возможности для создания материалов с уникальными свойствами, которые могут найти применение в различных областях науки и техники. К таким перспективным материалам относятся сферопластики или синтактные пены, формируемые на основе полимерного связующего и стеклянных микросфер. Они уже нашли широкое применение в авиационной и ракетной технике, а также судостроении, благодаря таким важным свойствам, как низкая плотность и теплопроводность. В качестве полимерных связующих синтактных пен наиболее часто применяют термореактивные (эпоксидные) смолы или кремнийорганические компаунды [1]. Эти материалы, с одной стороны, ослабляют воздействующие потоки энергии посредством напыленных на наполнитель тяжелых металлов, а с другой — демпфируют формирующийся в них механический импульс давления в результате необратимого схлопывания многослойных микросфер [2]. Особое внимание привлекает моделирование разрушения синтактической пены, что создает основу для изучения процессов возникновения и эволюции в синтактных пенах структур типа нановискеров – нитевидных структур, обладающих высокой анизотропией и специфическими физико-химическими характеристиками. Вольфрам, благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая плотность, температура плавления и механическая прочность, является перспективным материалом для создания микросфер. Введение вольфрама в сферопластик позволяет значительно улучшить его характеристики и расширить область применения.

Процессы при деформировании синтактных пен и пористых материалов при ударно-волновом, динамическом и статическом сжатии достаточно подробно изучены и связаны с особенностями их деформирования при схлопывании пористости [3, 4, 5, 6, 7]. Большой интерес представляет динамическое нагружение стеклосфер, поверхности которых модифицированы металлическим покрытием, позволяющим повысить их электропроводность и соответственно степень экранирования электромагнитных полей [8].

Экспериментальное изучение тепловых процессов в синтактных пенах при ударно-волновом воздействии показало большое локальное повышение температуры в образующихся «горячих точках» при коллапсе микросфер. Имеется целый ряд возможных механизмов такого нагрева, например, гидродинамическое течение, адиабатический нагрев газа, пластическая и вязкопластическая деформация при высоких скоростях сдвига. Температура образующихся «горячих точек» при коллапсе микросфер и динамика распространения ударной волны в синтактной пене зависят от интенсивности

ударной волны и вязкости материала, окружающего микросферу [9, 10]. Важно учитывать, что схлопывание пористости в вольфраме позволяет достигать более высокой плотности вещества и, соответственно, глубины проникновения в преграду, чем при ударе монолитным металлом [11]. Тепловые и гидродинамические явления лежат в основе недавно обнаруженного формирования нанонитей при коллапсе микросфер, вызванного воздействием ударной волны, причем процессу структурообразования способствует нанесение пленки вольфрама на поверхность стеклосфер [12, 13, 14, 15]. Поэтому разработка численных методов и алгоритмов детального моделирования энерговыделения при действии ударной волны на синтактные пены и пористые материалы представляется весьма актуальной проблемой.

В связи с отмеченными свойствами сферопластиков актуальными являются задачи моделирования их прочностных свойств. Плотность расположения сферических включений в связующем достаточно высокая. Так, например, в 1 мм^3 композиционного материала содержится $\sim 10^3$ сферических включений. Непосредственное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) сферопластика – достаточно трудоемкая вычислительная задача. Плотность расположения сферических включений в связующем достаточно высокая. Так, например, в 1 мм^3 композиционного материала содержится $\sim 10^3$ сферических включений. Реалистичным выглядит подход к моделированию НДС, в котором на первом этапе следует проделать процедуру осреднения свойств гетерогенного материала. Для этого можно воспользоваться результатами теории, изложенной, например, в монографии [2]. Кроме того, при таком подходе необходимо провести расчет НДС для отдельного сферического элемента, нагруженного волной давления.

В данной работе рассматривается процесс формирования разрушения в полимерном сферопластике, наполненном стеклянными микросферами, поверхность которых модифицирована вольфрамом, под воздействием ударных волн [16]. Вольфрам, благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая плотность, температура плавления и механическая прочность, является перспективным материалом для формирования нановискеров. Введение вольфрама в сферопластик позволяет значительно улучшить его характеристики и расширить область применения.

Целью данного исследования является изучение коллапса стеклянной микросферы, поверхность которой модифицирована вольфрамом, при воздействии ударных волн.

Моделирование волновых процессов позволяет не только глубже понять механизмы, лежащие в основе процесса формирования наноструктур при коллапсе микросфер, но и оптимизировать параметры экспериментальных условий для достижения наилучших результатов. Результаты данного исследования могут найти применение в различных областях, включая наноэлектронику, материаловедение, биомедицину и другие высокотехнологичные отрасли. Понимание процессов, происходящих при

взаимодействии ударных волн с материалами, позволит разработать новые методы и технологии для создания нановискеров с заданными свойствами, что откроет новые возможности для научных и технических разработок.

Математическая модель газодинамических и упругопластических волновых процессов

Исходная система уравнений, описывающая термомеханические эффекты в объекте, подвергающемся воздействию ударной волны, основана на моделях механики сплошной среды. Полная система уравнений включает уравнения и определяющие соотношения (кинематические, физические), описывающие гидрогазодинамику испаряемого материала, упругие, пластические волны, вязкопластические деформации и разрушение в твердом остатке мишени [17].

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

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

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

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } i = j, \\ 0, & \text{при } i \neq j. \end{cases}$$

В системе (1) – (2) используются следующие обозначения: t – время, ρ – плотность, $\vec{w} = (w_x, w_y, w_z)^T$ – скорость, E – удельная внутренняя энергия, P – давление, T – температура, σ – тензор напряжений, s – девиатор тензора напряжений, $\dot{\epsilon}$ – тензор скоростей деформаций, $\dot{\lambda}$ – удельная мощность пластической деформации, \vec{F} – вектор внешних сил, χ – коэффициент теплопроводности, G – модуль сдвига, η и μ – упругие постоянные Ламэ, α – коэффициент теплового расширения, K – модуль объемного сжатия, Y_0 – предел текучести.

Материальные уравнения

Система законов сохранения (1) – (2) должна быть дополнена уравнениями состояния (УРС) и реологическими соотношениями, которые содержат информацию о свойствах конкретного вещества. При воздействии ударной волны 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.

В предлагаемых методиках использовались заранее рассчитанные УРС в табличной форме, подготовленные с помощью программного комплекса THERMOS [18, 19]. Таблицы УРС содержат зависимости давления, внутренней энергии, теплопроводности и оптических свойств материала от его плотности и температуры, тем самым замыкая систему (1) – (2).

В комплексе программ THERMOS реализованы следующие апробированные на большом количестве практических задач модели, предназначенные для расчета уравнений состояния и оптических характеристик конструкционных материалов и рабочих сред и подробно описанные в книге [20].

Обобщенная модель Томаса-Ферми применима при высоких температурах и давлениях. Модели ионизационного равновесия Саха-Больцмана с потенциалами ионизации, энергиями возбуждения, полученными либо из эксперимента, либо с использованием многоконфигурационного приближения Хартри-Фока.

Эффективный вариант модели Хартри-Фока-Слэтера и Дирака-Фока-Слэтера необходим для расчетов термодинамических и оптических свойств

(спектральных характеристик, коэффициентов электронной теплопроводности плазмы и т.п.).

Комплекс программ THERMOS позволяет рассчитывать табличные уравнения состояния для большинства химических элементов, а также для веществ, имеющих сложный химический состав. Для смеси элементов универсальным условием равновесия является равенство химических потенциалов компонентов смеси, причем объем "молекулы" смеси должен быть равен сумме объемов отдельных компонентов.

Для описания жидкой и твердой фазы вещества при низких температурах предназначены полуэмпирические уравнения состояния, в котором учитываются фазовые переходы и возможность наличия метастабильных состояний. Данные модели также реализованы в программном комплексе THERMOS, термодинамически согласованное одиннадцатиконстантное УРС-11 [21, 22] строится на основе определяемых экспериментальным путем констант для нормальных условий и экстраполяции с помощью теоретических зависимостей в области существования плазмы с учетом ее неидеальности и вырождения электронного компонента. Давление и удельная внутренняя энергия складываются из потенциальных, тепловых и электронных составляющих.

УРС-11 успешно применяется для расчетов интенсивных динамических воздействий на различные материалы [23].

В данных УРС при плотности вещества, меньшей нормальной, в некотором диапазоне температур изотермы давления немонотонны с изменением знака первой производной по плотности, то есть существуют критические параметры и область двухфазных состояний в том же смысле, что и в уравнении состояния Ван-дер-Ваальса. Учитывать такие состояния необходимо при расчетах параметров механического действия. В то же время при решении газодинамических уравнений такое поведение изотерм давления может приводить к серьезным проблемам со сходимостью решения сеточных систем и требует коррекции. Для этого в данной области строится так называемая Максвелловская конструкция, т.е. рассчитывается равновесие фаз из условия выполнения правила Максвелла для давления насыщенного газа.

Выбор уравнения состояния

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.

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

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

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

Модель многокомпонентной смеси

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

Будем считать, что смесь состоит из N компонентов, α_n – массовая концентрация n -го компонента (отношение массы n -го компонента к полной массе смеси), ρ_n – плотность n -го компонента, $n = 1 \div N$.

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

Для каждого компонента 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 компонентов, где в любом макроскопическом объеме присутствуют все компоненты в соотношении, определяемом массовыми концентрациями, каждый из компонентов заполняет объем, совершенно не испытывая влияния других компонентов, находящихся в том же объеме.

Зная плотности компонент ρ_n и УРС $P_n = P_n(\rho_n, T)$ и $E_n = E_n(\rho_n, T)$ для каждого 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 [23], 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 осуществляется на основании критериев, описанных в [17], которые

применяются к расчетной ячейке в целом. Выбор УРС для каждого компонента выполняется так, как это описано в [17].

Моделирование воздействия ударной волны на микросферу

Объектом исследования является многослойная сферическая преграда. Геометрическая модель показана на рисунках 1, 2. Внешний слой – связующее из эпоксидной смолы толщиной 7.35 мкм, промежуточный слой – вольфрам толщиной 0.15 мкм, внутренний слой из стекла толщиной 2.50 мкм. Вакуумная область расположена в центре сферической конструкции, радиус вакуумной области 10.00 мкм. В качестве нагрузки используется объемное распределение энерговклада $Qs(x,y,z,t)$, которое соответствует распределению термодинамических параметров при падении плоской ударной волны на сферическую поверхность. Распределение энерговклада задавалось в табличном виде. В результате воздействия в объекте формируется квазисферическая ударная волна с максимальной амплитудой давления 21 ГПа в точке торможения. Расчет проводился на гибридной сетке, состоящей из тетраэдров и призм, количество сеточных элементов – $7.4 \cdot 10^6$.

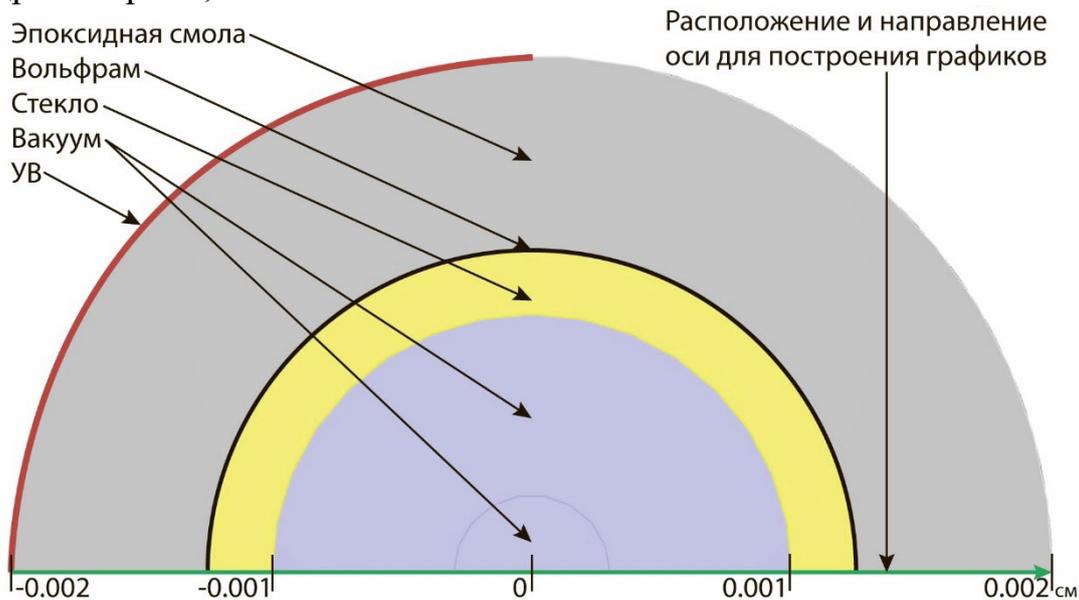


Рис. 1. Геометрическая модель.

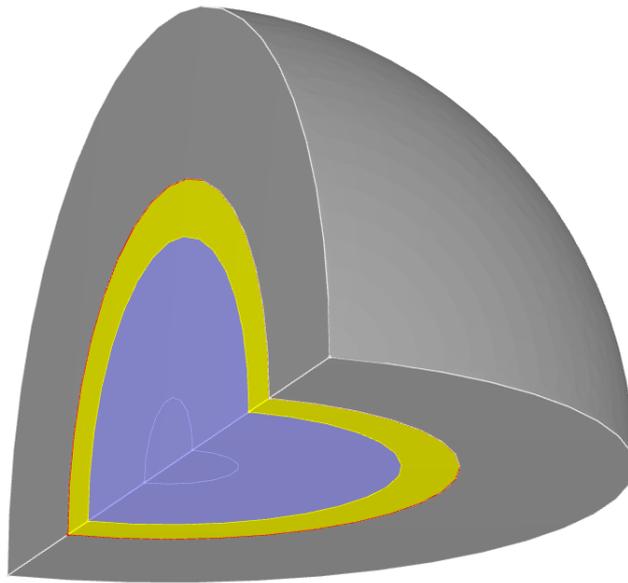


Рис. 2. Геометрическая модель и расчетная область.

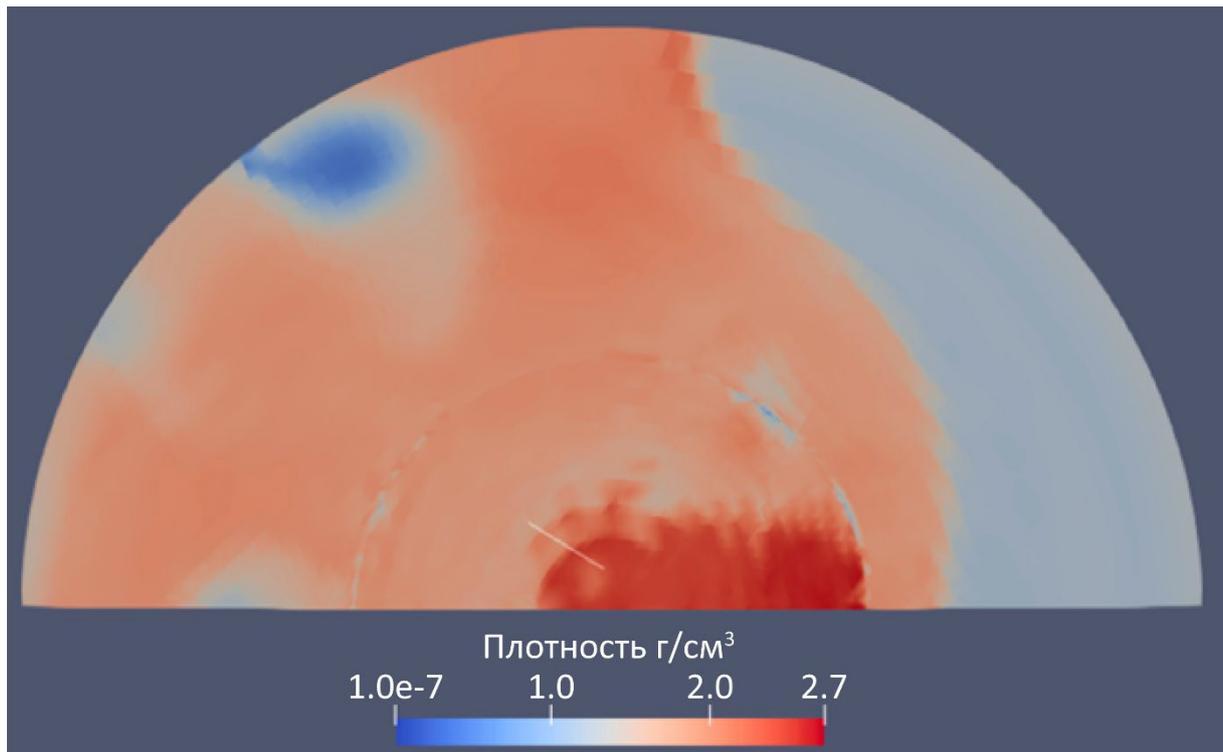


Рис. 3. Распределение плотности на момент времени 0.003 мкс.

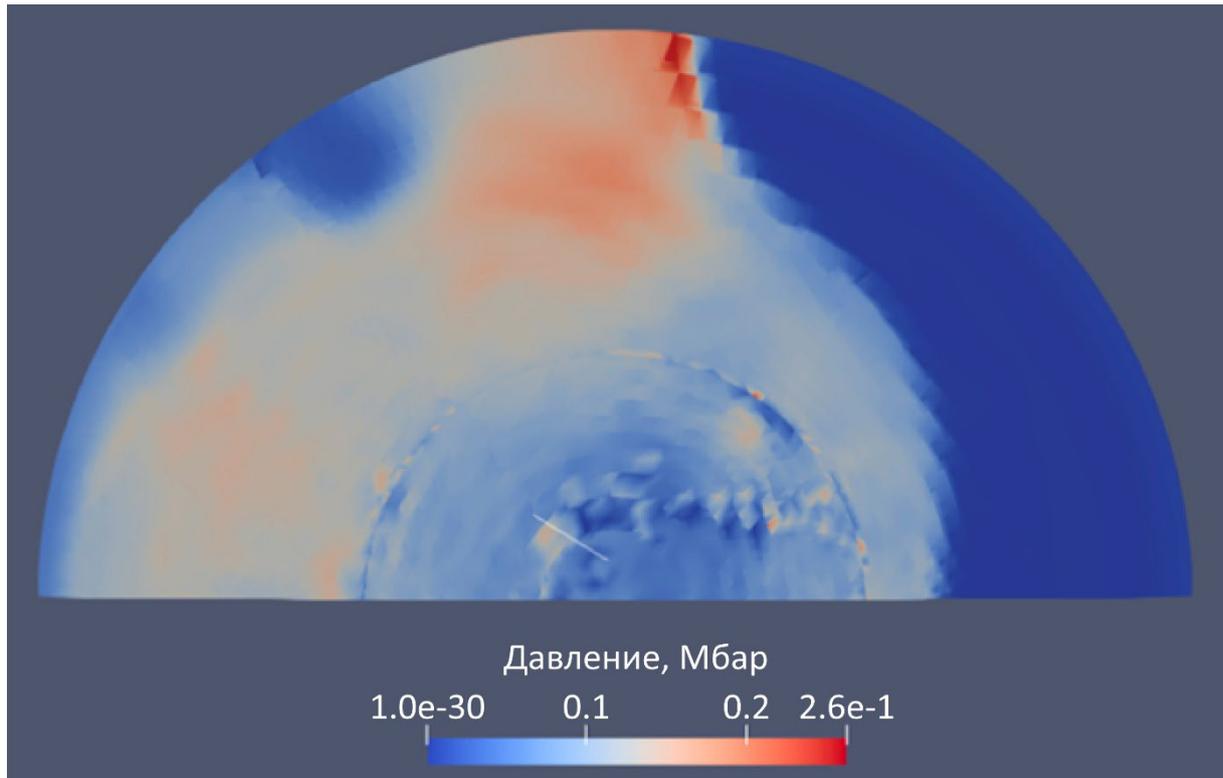


Рис. 4. - Распределение давления на момент времени 0.003 мкс.

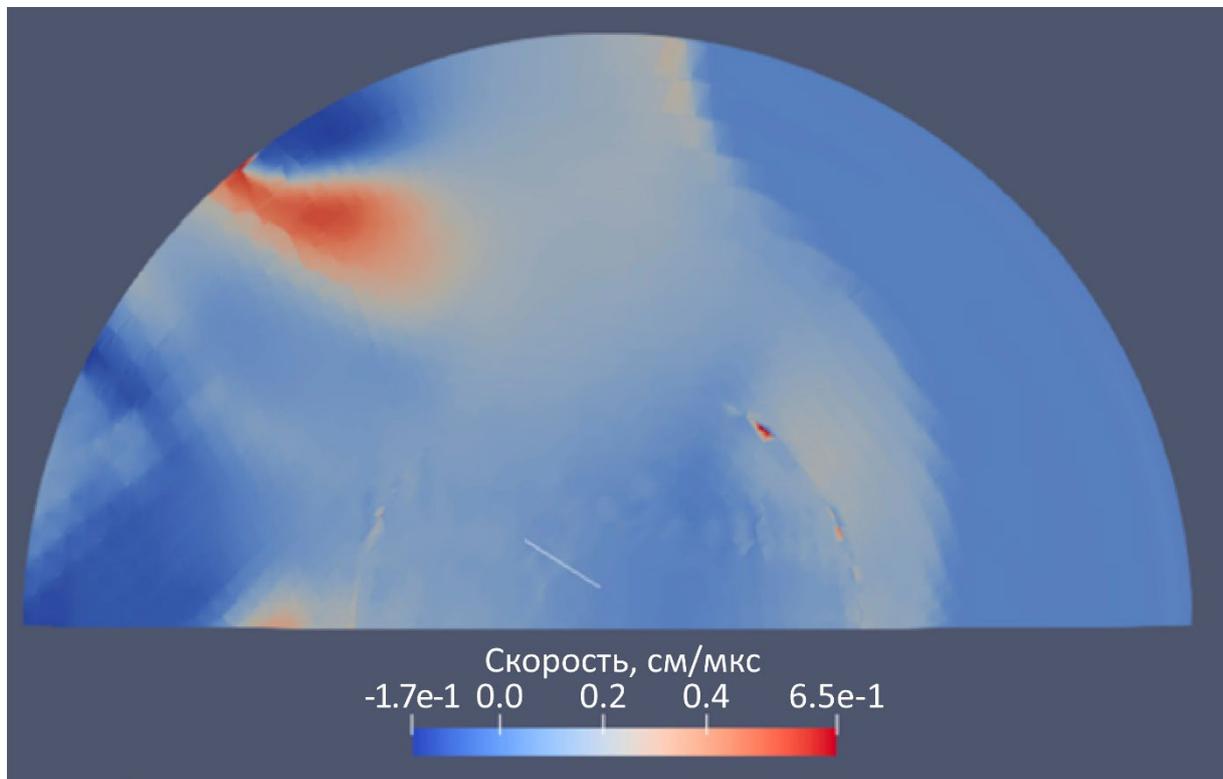


Рис. 5. Распределение скорости на момент времени 0.003 мкс.

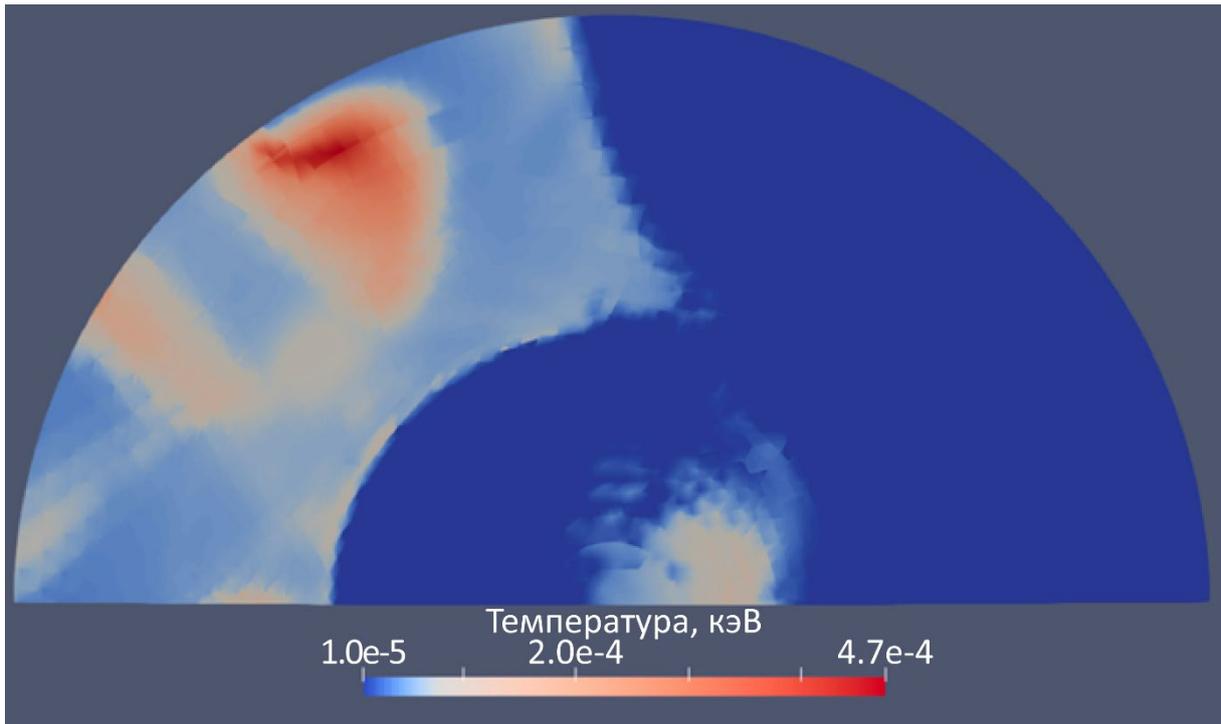


Рис. 6. Распределение температуры на момент времени 0.003 мкс.

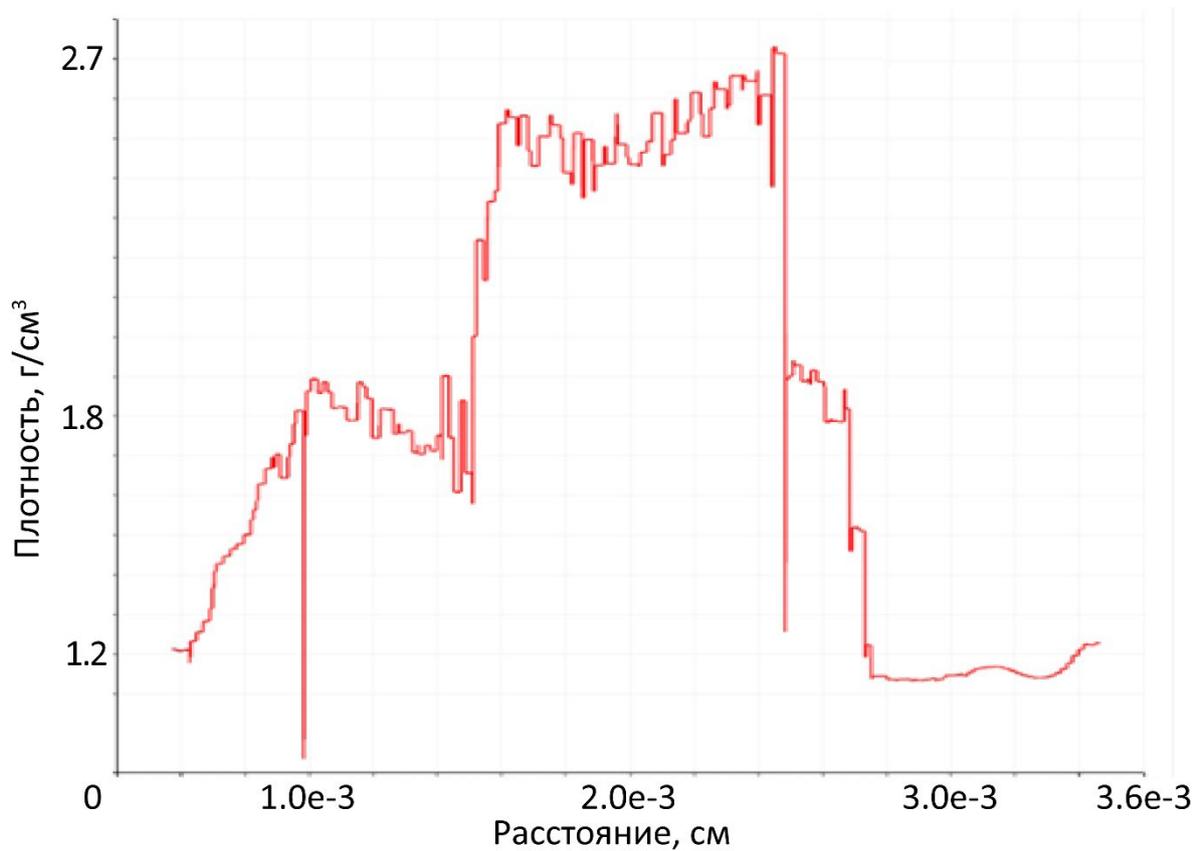


Рис. 7. Распределение плотности по оси 0Z на момент времени $t = 0.003$ мкс.

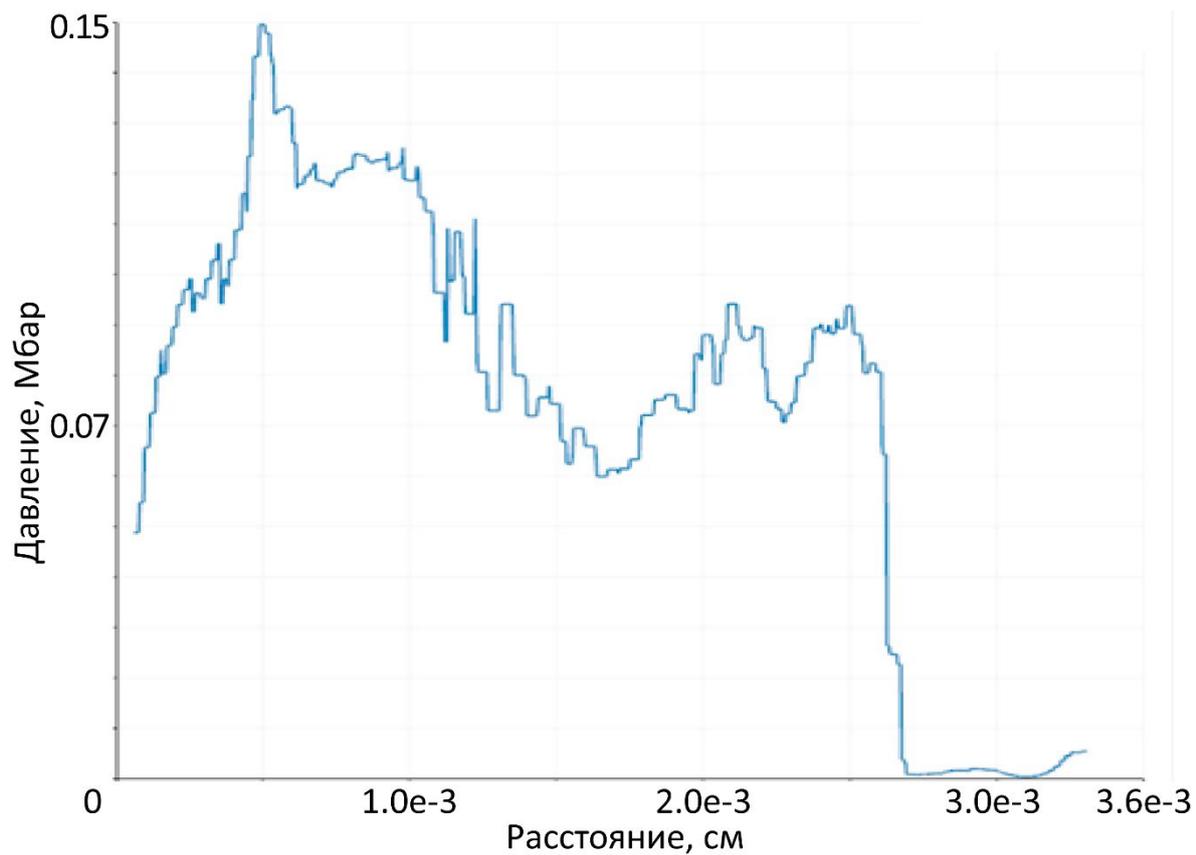


Рис. 8. Распределение давления по оси OZ на момент времени $t = 0.003$ мкс.

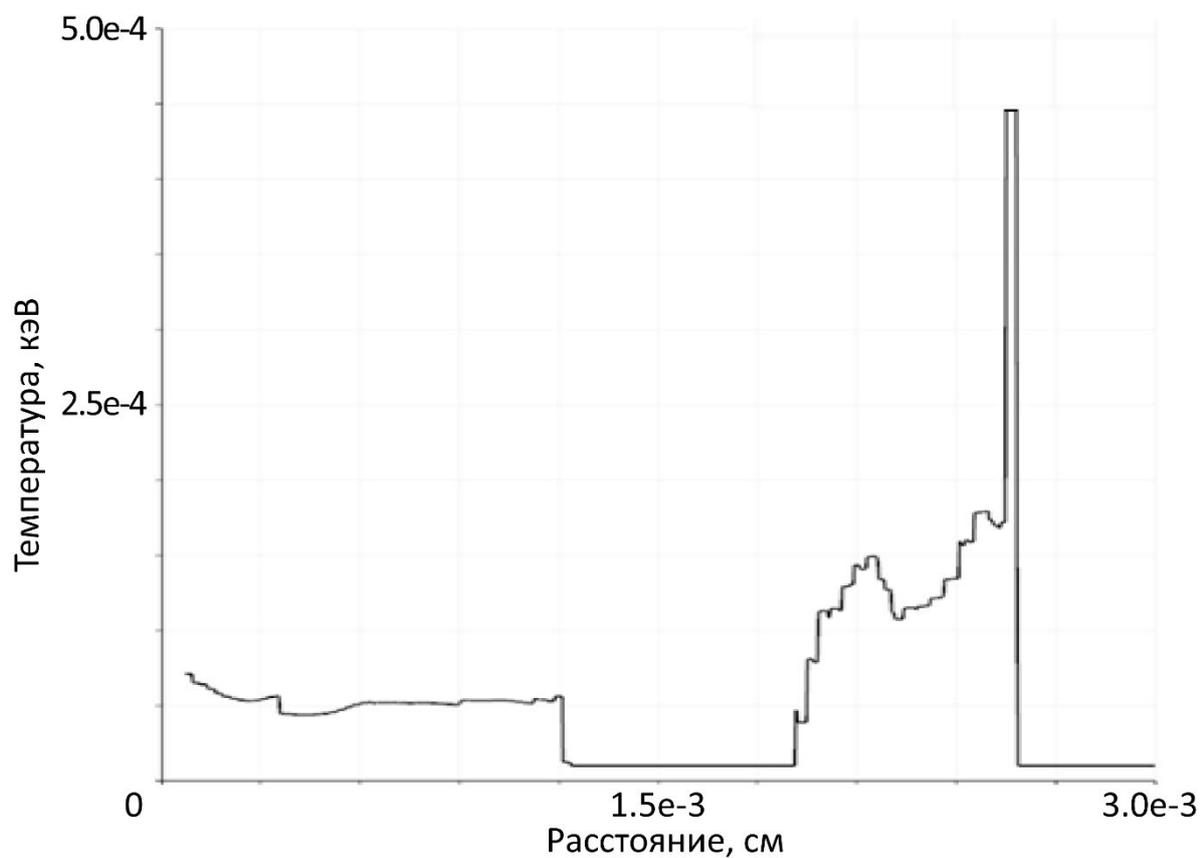


Рис. 9. Распределение температуры по оси OZ на момент времени $t = 0.003$ мкс.

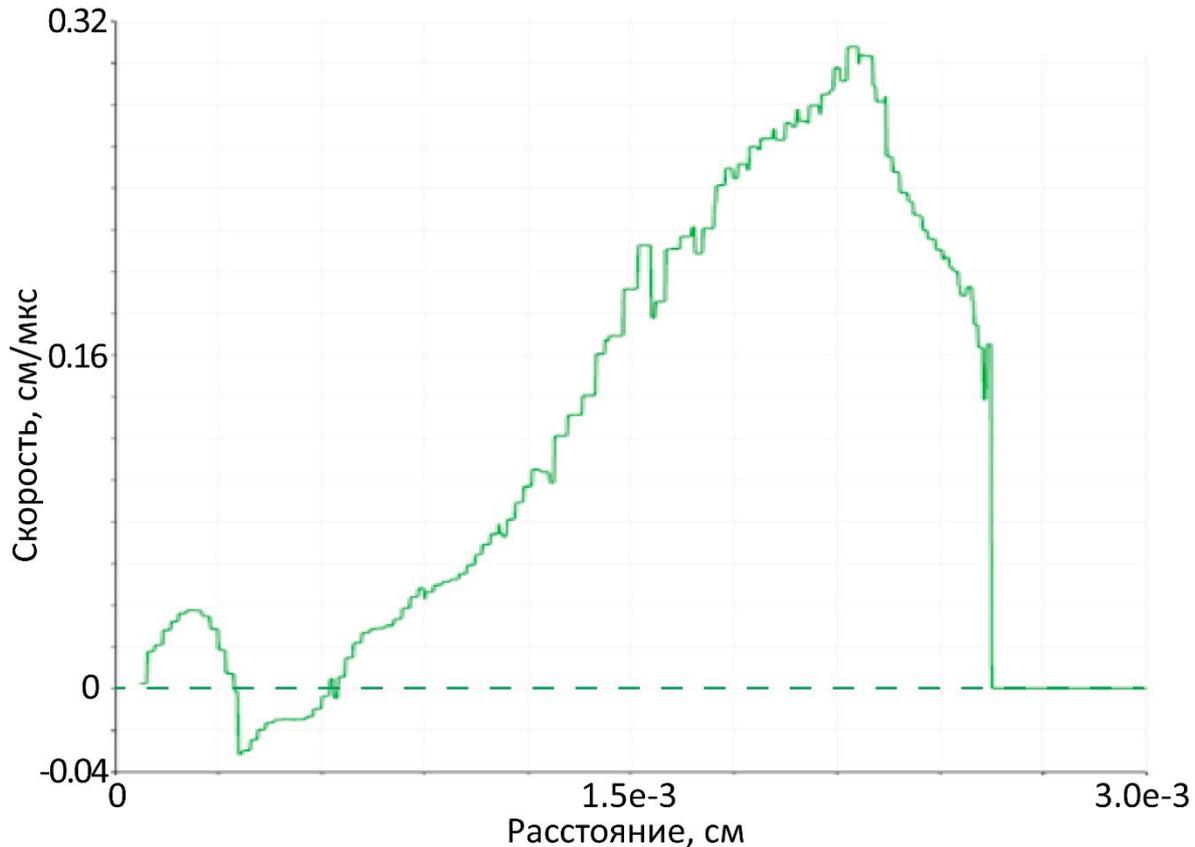


Рис. 10. Распределение скорости по оси OZ на момент времени $t = 0.003$ мкс.

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 $\sim 70\%$ вакуумной области. Смесь остывает до твердотельной температуры 900 градусов за ~ 82 мкс.

Выводы

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 сферопластика к деформации и разрушению. Взаимодействие ударных волн с материалом приводит к сложным процессам на микро- и наноразмерном уровне, включая локальное нагревание, пластическую деформацию и фазовые превращения.

Определены начальные условия для формирования нитевидных структур в вольфрамсодержащем сферопластике. Так, при давлении во фронте ударной волны $P_{\max} = 21$ ГПа коллапс микросфер сопровождается повышением

температуры $T_{\max} = 7000$ К, плотность в коллапсирующем объеме достигает 26 г/см^3 , а скорость деформации вещества – 1.54 мкс^{-1} .

Анализ процесса разрушения элементарной ячейки сферопластика 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.

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.

Формирование неоднородных структур при коллапсе микросферы при воздействии ударной волны в вольфрамовом включении указывает на сложные физико-химические процессы, происходящие в материале. В результате вычислительного эксперимента показано, что за время расчета наблюдается формирование продолговатых структур.

Пластичное состояние смеси (стекло, вольфрам, ЭПК) и её сжатие в объем микросферы демонстрирует, что материал подвергается значительным деформациям. Заполнение 70% первоначально полый области, занимаемой микросферой, свидетельствует о высокой степени ее сжатия и перемешивания, что обеспечивает протекание высокотемпературных превращений вещества как микросферы, так и полимерной матрицы.

Охлаждение смеси до температуры 900 градусов за 82 мкс указывает на высокую скорость теплопередачи и затвердевания. Это может быть полезным для процессов, требующих быстрого охлаждения, но также требует учета возможных термических напряжений и деформаций.

Полученные результаты имеют важное значение для разработки новых композиционных материалов с улучшенными механическими и термическими свойствами. Понимание механизмов взаимодействия ударных волн с вольфрамсодержащим сферопластиком и условий формирования нитевидных структур открывает перспективы для создания материалов, устойчивых к экстремальным воздействиям, что может быть использовано в аэрокосмической, авиационной и других высокотехнологичных отраслях.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию состава синтактной пены, а также на изучение влияния других факторов, например скорости охлаждения, наличия дополнительных легирующих элементов, на процесс формирования нановискеров и устойчивость материала к ударным нагрузкам.

Библиографический список

1. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с наполнителем. Справочник. М.: Машиностроение. — 1991.

2. Острик А.В. Прогнозирование защитных свойств покрытий из сферопластиков при воздействии высокоинтенсивных потоков ионизирующего излучения // Деформация и разрушение материалов. — 2010. — № 2. — С. 36-43.
3. Мержиевский Л.А., Реснянский А.Д. О моделировании динамического деформирования сферопластика // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28. — № 3. — С.119-121.
4. Viot P., Shankar K., Bernard D. Effect of strain rate and density on dynamic behaviour of syntactic foam // Composite Structures. — 2008. — V. 86. — № 4. — p. 314–327.
5. Димитриенко Ю.И., Сборщиков С.В., Соколов А.П., Гафаров Б.Р., Садовничий Д.Н. Численное и экспериментальное моделирование прочностных характеристик сферопластиков // Композиты и наноструктуры. — 2013. — № 3. — С. 35-51.
6. Квасов И.Е., Левянт В.Б., Петров И.Б. Численное исследование волновых процессов в пористой среде с использованием сеточно-характеристического метода // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2016. — том 56. — № 9. — С. 1645–1656 DOI: 10.7868/S004446691609012X
7. Медведев А.Б., Трунин Р.Ф. Ударное сжатие пористых металлов и силикатов // Успехи физических наук. — 2012. — Т. 182. — № 8. — С. 829–846. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201208b.0829>
8. Meng X.-F., Shen X.-Q., Liu W. // Appl. Surf. Sci. 2012. — Vol. 258. — N 7. — p. 2627–2631.
9. Караханов С.М., Пластинин А.В., Бордзиловский Д.С., Бордзиловский С.А. Время формирования горячих точек при ударном сжатии микробаллонов в конденсированной среде // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, — № 3. — С. 105–113.
10. Dattelbaum D. M., Coe J. D. Shock-driven decomposition of polymers and polymeric foams // Polymers. — 2019. — V. 11. — N. 3. — p. 493–516 <https://doi.org/10.3390/polym11030493>.
11. Герасимов С.И., Калмыков А.П., Иоилев А.Г., Кузьмин В.А., Маскайкин С.А. Исследование соударения ударника из пористого вольфрама с комбинированной преградой // Проблемы прочности и пластичности. — 2023. — Т. 85, — № 3, — С. 414-425. DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-3-414-425
12. Милёхин 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.
13. 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.
14. Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М., Шереметьев К.Ю., Казаков Е.Д., Марков М.Б., Савенков Е.Б. Фазовые превращения и образование нановолокон при воздействии наносекундного пучка релятивистских электронов на синтактные пены с полимерным силоксановым связующим // Журнал прикладной химии. — 2022. — Т. 95. — Вып. 1. — С. 87-99.
 15. Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М., Малинин С.А., Потапенко А.И., Чепрунов А.А., Ульяненок Р.В., Шереметьев К.Ю., Перцев Н.В., Марков М.Б., Савенков Е.Б. Экспериментальное изучение образования нитевидных структур и свойств сферопластика при ударно-волновом воздействии // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57. — Вып. 2. — С. 123-131. DOI:10.15372/FGV20210213
 16. 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.
 17. Бойков Д.С. Сквозной расчет термомеханических процессов в твердом теле с динамическим контролем агрегатного состояния // Математическое моделирование, — 2024, — том 36, — номер 4, — С.166-182.
 18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. THERMOS: Библиотека функций для расчета радиационных и термодинамических свойств различных веществ и смесей в широкой области температур и плотностей / Новиков В.Г., Соломянная А.Д., Вичев И.Ю., Грушин А.С.; правообладатель ИПМ им. М.В. Келдыша РАН; № 2013616315; заявл. 27.05.2013; зарег. 03.07.2013;
 19. <https://keldysh.ru/cgi/thermos/navigation.pl?ru.home>
 20. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы. — М: Физматлит, 2000. — 400 с.
 21. Сапожников А.Т., Першина А.В. Интерполяционное уравнение состояния в области испарения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. — 1984. Вып. 2 (16). — С. 29-34.
 22. Острик А.В., Ромадинова Е.А. Модель уравнения состояния в области существования двухфазной смеси жидкость - пар с учетом метастабильности при низких температурах // Межотраслевой научно-технический журнал "Конструкции из композиционных материалов", 2004. Вып. 2. С. 42-49.
 23. Грибанов В.М., Острик А.В., Ромадинова Е.А. Численный код для расчета многократного комплексного действия излучений и частиц на

- многослойный многофункциональный гетерогенный плоский пакет (код «ММНПП-1»). – Черногловка: ИПХФ РАН, 2006. – 92 с.
24. Gasilov V.A., Boldarev A.S., Olkhovskaya O.G., Boykov D.S., Sharova Yu.S., Savenko N.O., Kotelnikov A.M. MARPLE: software for multiphysics modelling in continuous media // Numerical Methods and Programming. 24 (4), 316–338 (2023). doi 10.26089/NumMet.v24r423

Оглавление

Введение	3
Математическая модель газодинамических и упругопластических волновых процессов	5
Материальные уравнения	6
Модель многокомпонентной смеси.....	8
Моделирование воздействия ударной волны на микросферу	9
Выводы	14
Библиографический список.....	15