



XVII Международная конференция  
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»,  
19–23 мая 2025 г.  
Снежинск, Челябинская область, Россия

---

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МОНОЛИТНЫХ И РАЗНЕСЕННЫХ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**Радченко П.А., Радченко А.В., Батуев С.П., Кануткин А.В.**

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Томск*

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00421,  
<https://rscf.ru/project/24-21-00421/>*

неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla_i v^i = 0$$

движения

$$\rho a^k = \nabla_i \sigma^{ik} + F^k$$

энергии

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma^{ij} e_{ij}$$

$$a^k = \frac{\partial v^k}{\partial t} + v^i \nabla_i v^k$$

$$\nabla_i \sigma^{ik} = \sigma_{,i}^{ik} + \Gamma_{im}^k \sigma^{im} + \Gamma_{im}^m \sigma^{ik}$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i), \quad i, j = 1, 2, 3$$

$$\sigma^{ij} = -P g^{ij} + S^{ij}$$

$$P(V) = K_4 \left( \frac{V_0}{V} \right)^4 - K_3 \left( \frac{V_0}{V} \right)^3 + K_2 \left( \frac{V_0}{V} \right)^2 - K_1 \left( \frac{V_0}{V} \right) + K_0$$

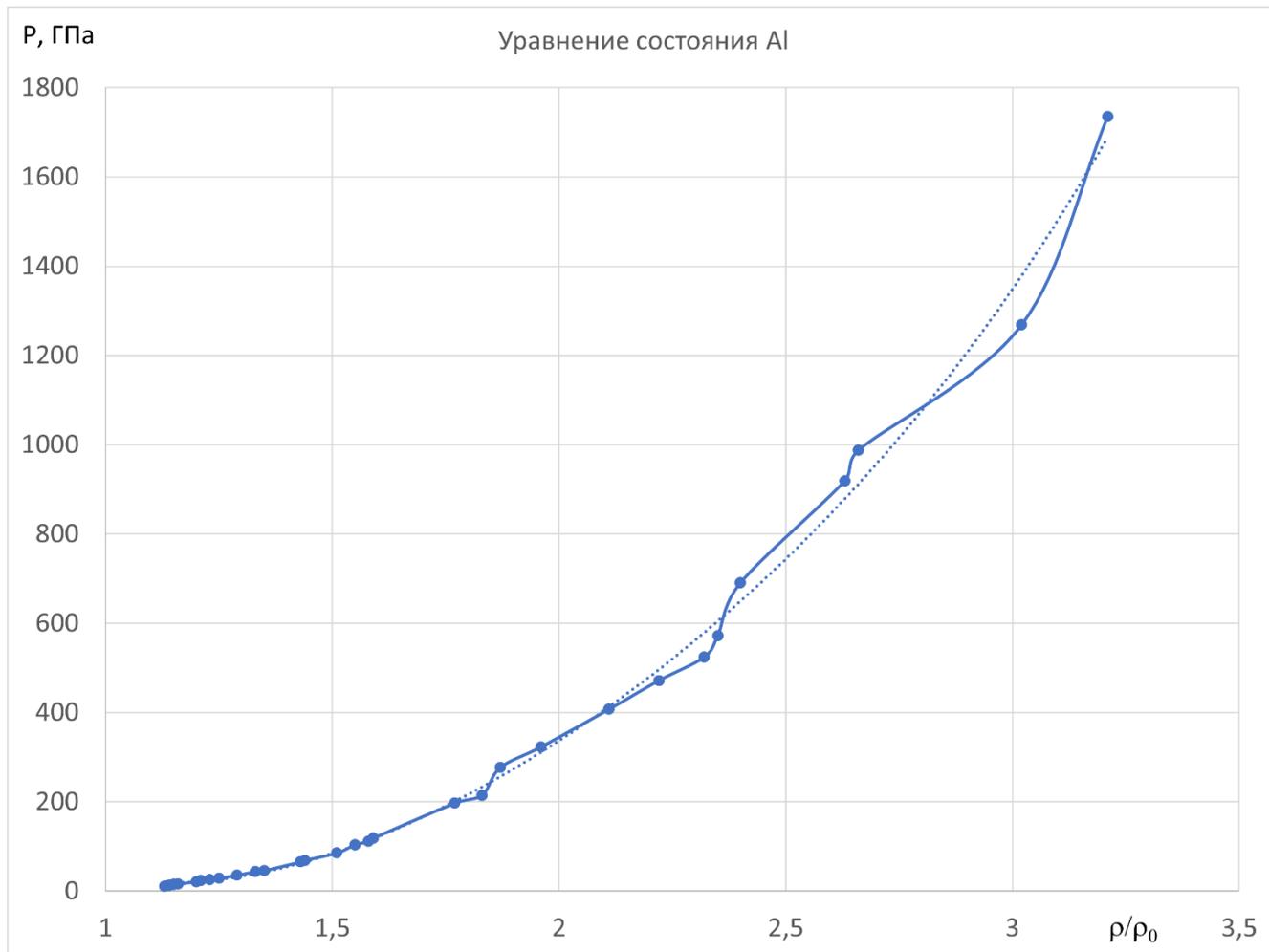
$$K_4 = 55,7 \text{ ГПа}, K_3 = 444,6 \text{ ГПа}, K_2 = 1626,3 \text{ ГПа}, \\ K_1 = 2293,2 \text{ ГПа}, K_0 = 1083,5 \text{ ГПа}$$

$$2G \left( g^{im} g^{jk} e_{mk} - \frac{1}{3} g^{mk} e_{mk} g^{ij} \right) = \frac{DS^{ij}}{Dt} + \lambda S^{ij}$$

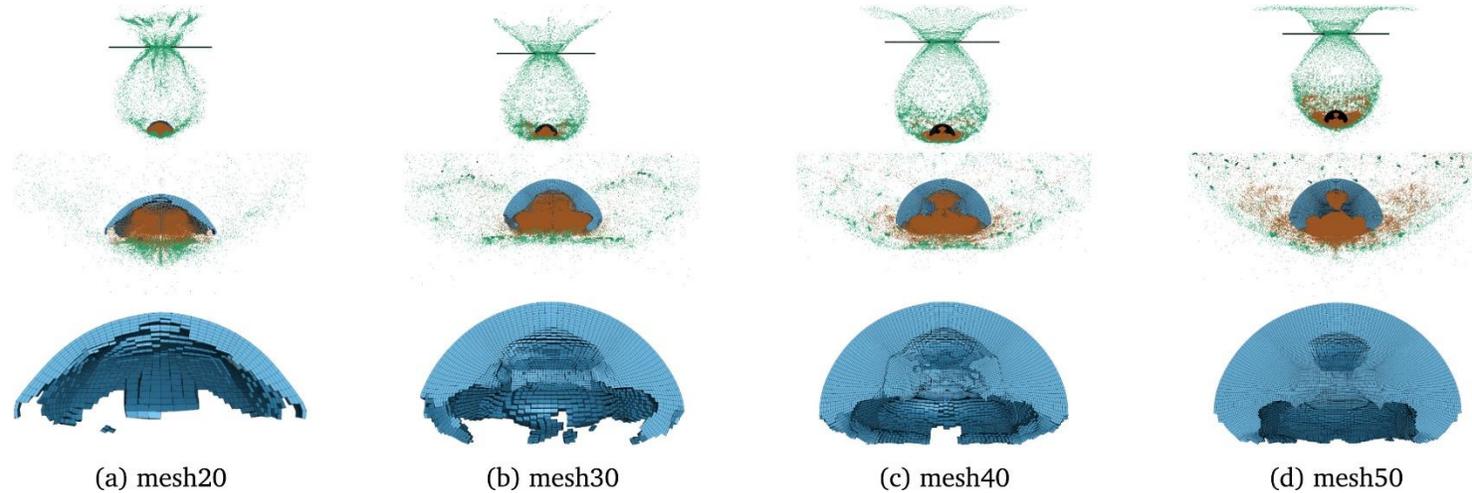
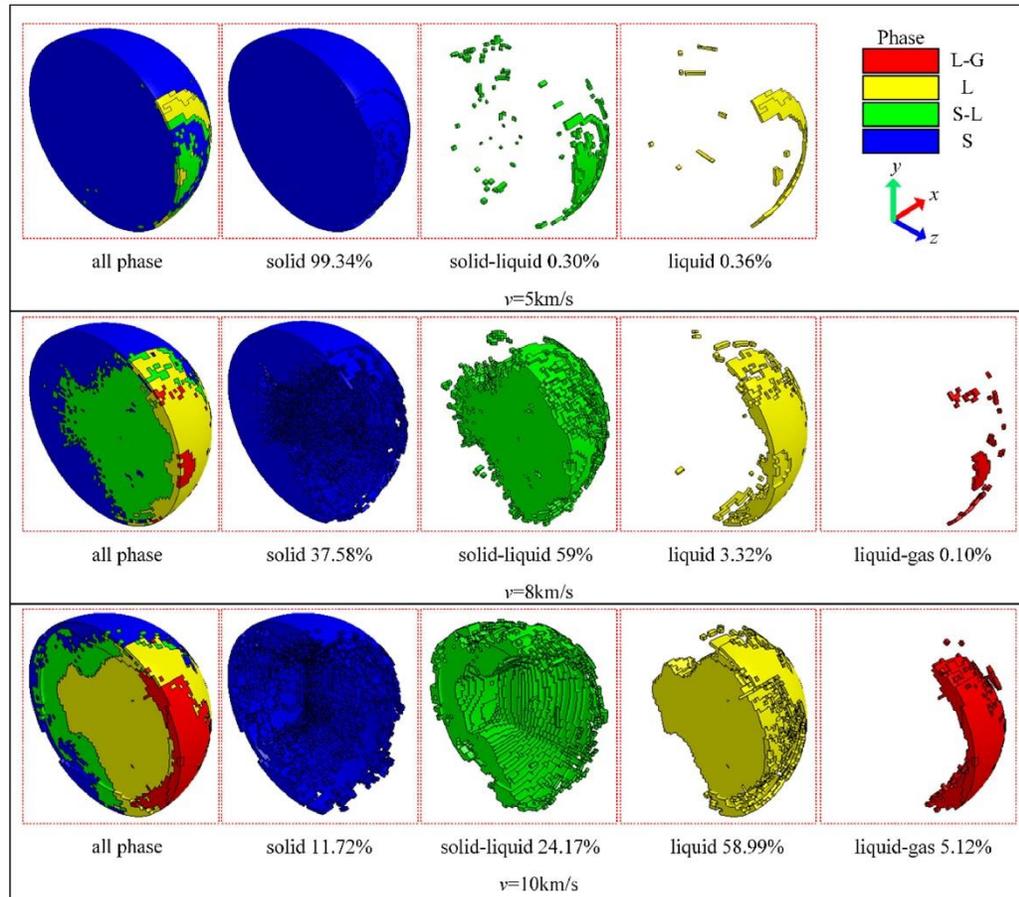
$$\frac{DS^{ij}}{Dt} = \frac{dS^{ij}}{dt} - g^{im} \omega_{mk} S^{kj} - g^{jm} \omega_{mk} S^{ik}$$

$$S^{ij} S_{ij} \leq \frac{2}{3} \sigma_d^2$$

Критерий разрушения  $e_u < \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}$



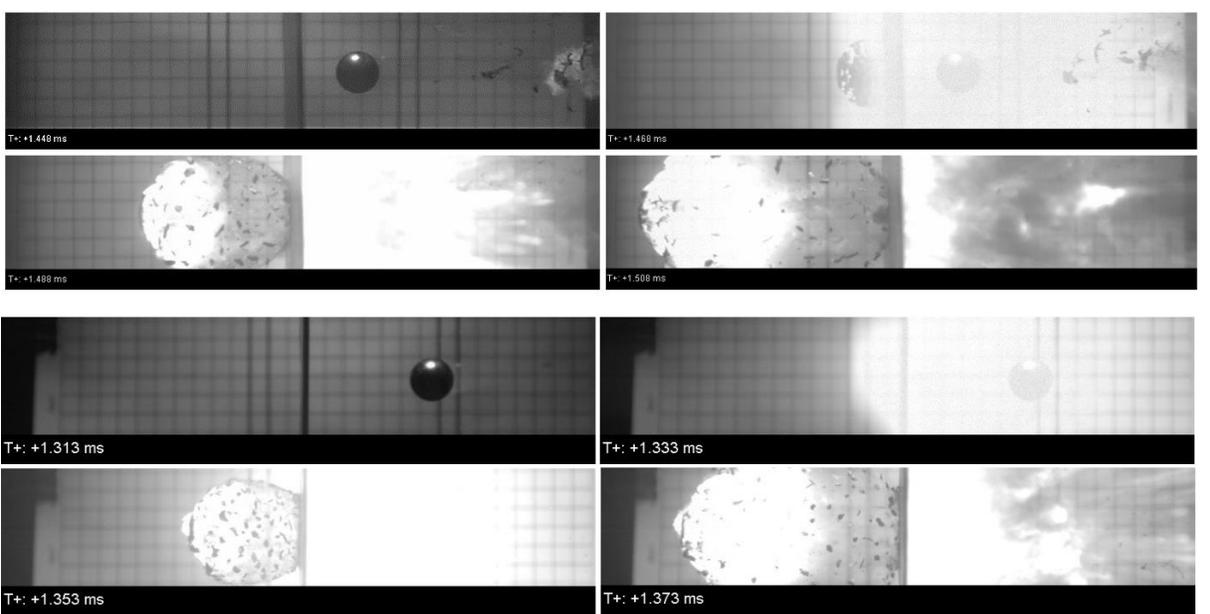
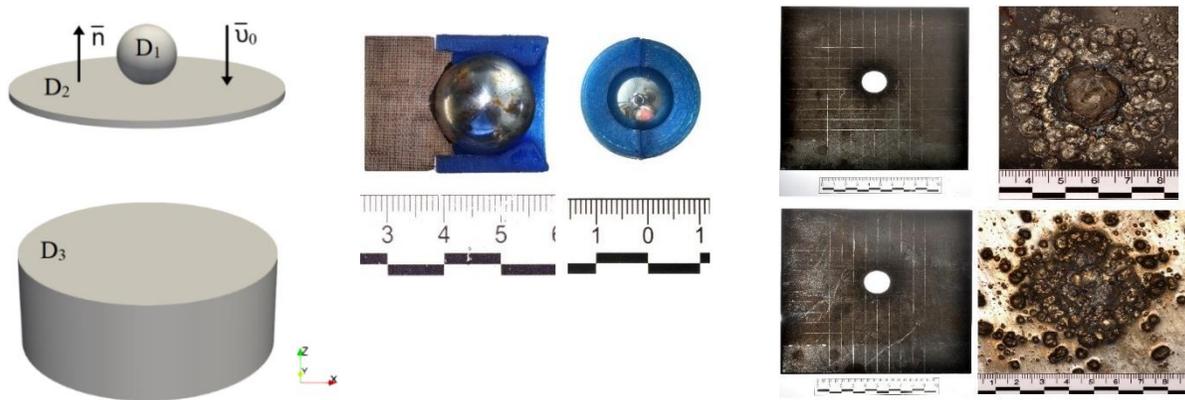
Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ : Науч. изд. / [Р. Ф. Трунин, Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов, Г. В. Симаков]; Под ред. Р. Ф. Трунина. - Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. - 446 с.



Samet Ceri, Zahra Sharif Khodaei Numerical investigation of hypervelocity impact simulation with FEM/SPH formulation for space structures // International Journal of Impact Engineering 187 (2024) 104926, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104926>

Lv-tan Chen, Qi-guang He, Xiao-wei Chen Numerical study on the phase-transition characteristics of debris cloud under hypervelocity impacts // International Journal of Impact Engineering 187 (2024) 104922, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104922>.

# СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ



a – 2099 м/с

b – 2312 м/с

a

b

	$v_r$ , м/с	$d_{ser}$ , мм.	$h_{wit}$ , мм	$d_{wit}$ , мм.
<b>Эксперимент, <math>v_0=1466</math> м/с</b>	1412	18,83	10,01	29,8
<b>Расчет, <math>v_0=1466</math> м/с</b>	1430	20	11,1	31
<b><math>\delta</math>, %</b>	1,3	6,2	10,9	4

<b>Эксперимент, <math>v_0=1986</math> м/с</b>	1852	20,53	12,32	22,03
<b>Расчет, <math>v_0=1986</math> м/с</b>	1894	20,8	12,5	24,3
<b><math>\delta</math>, %</b>	2,1	2,4	1,5	10,3

<b>Эксперимент, <math>v_0=2312</math> м/с</b>	2150	21,47	7,35	–
<b>Расчет, <math>v_0=2312</math> м/с</b>	1950	21	7,8	–
<b><math>\delta</math>, %</b>	9,3	2,2	6,1	–

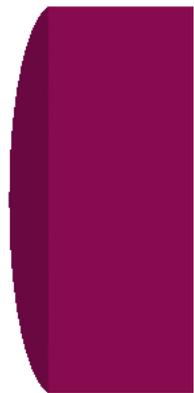
<b>Расчет, <math>v_0=6000</math> м/с</b>	5826	20,2	–	–
<b>Расчет, <math>v_0=7000</math> м/с</b>	6825	22	–	–



1466 м/с

1986 м/с

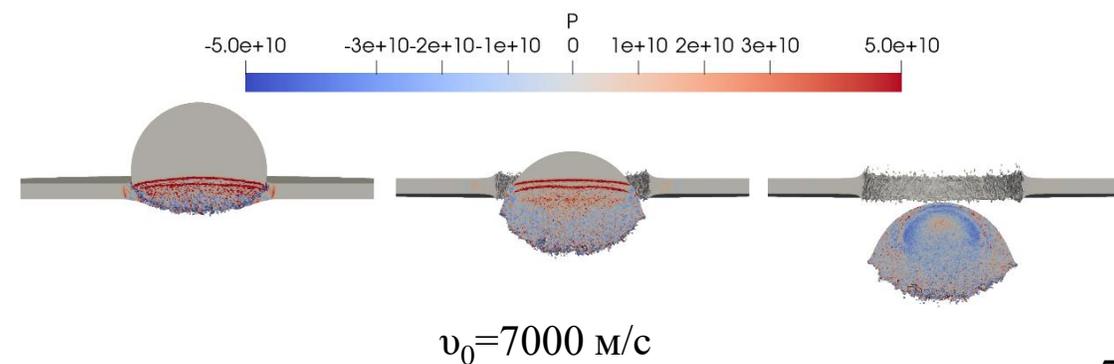
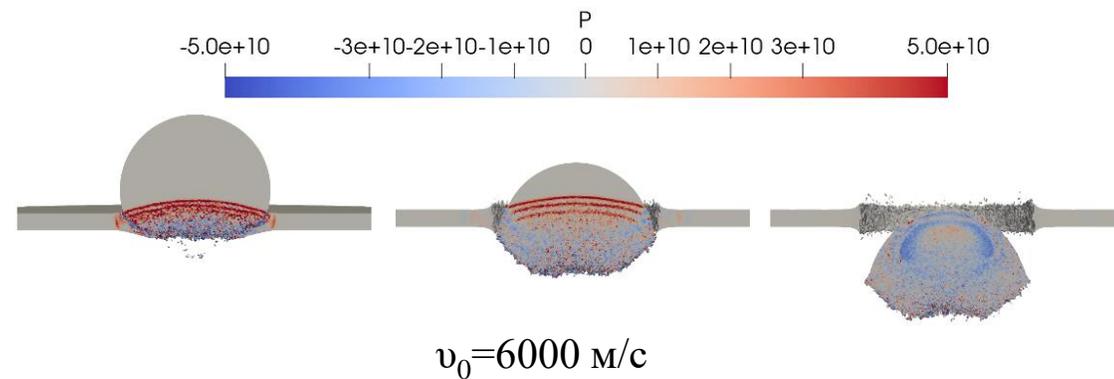
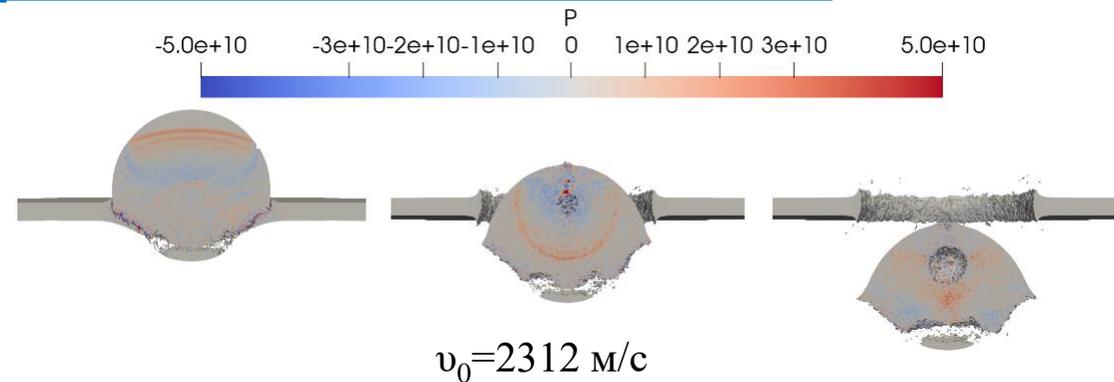
2312 м/с

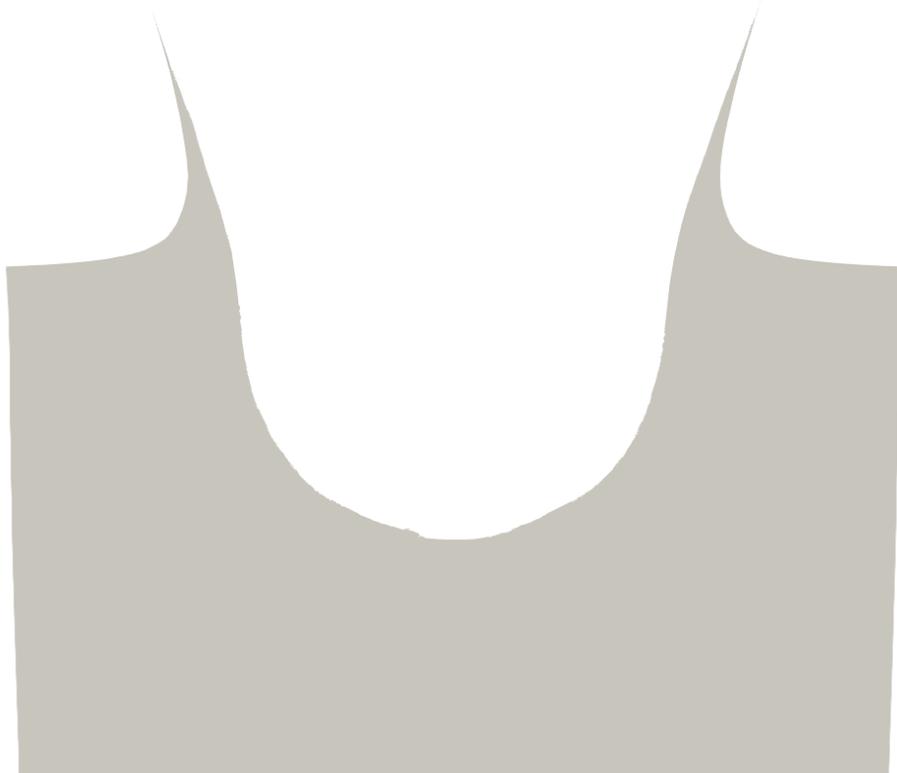


$v_0=1466$  м/с

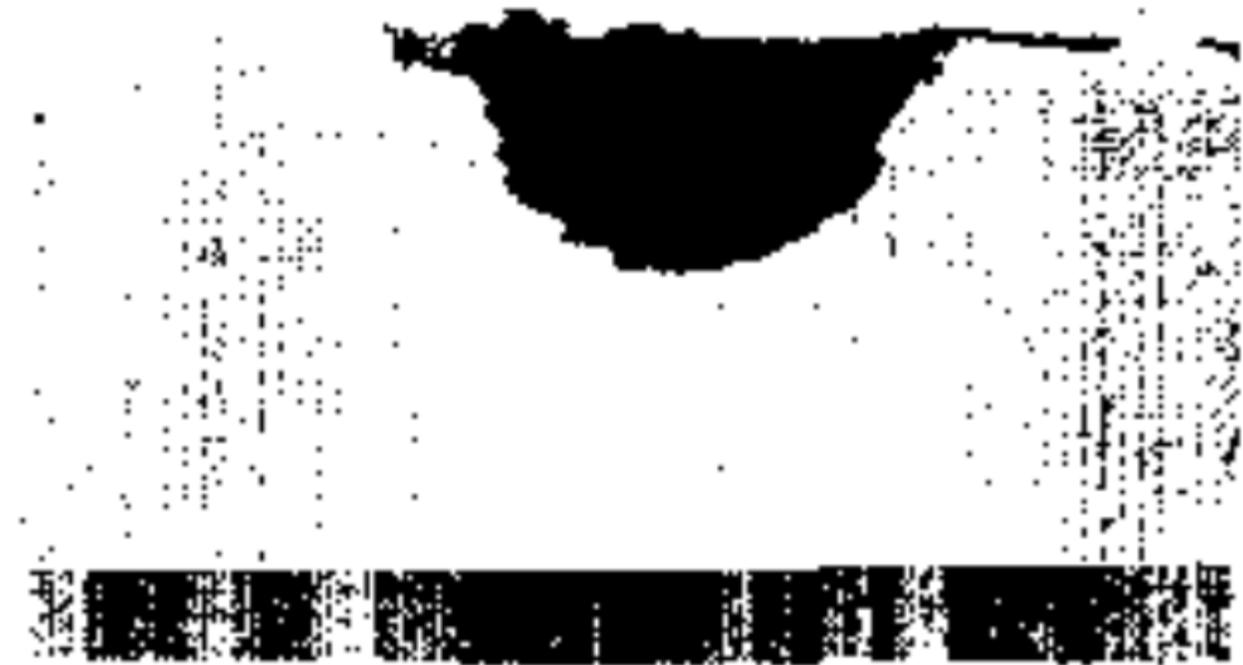


$v_0=1986$  м/с





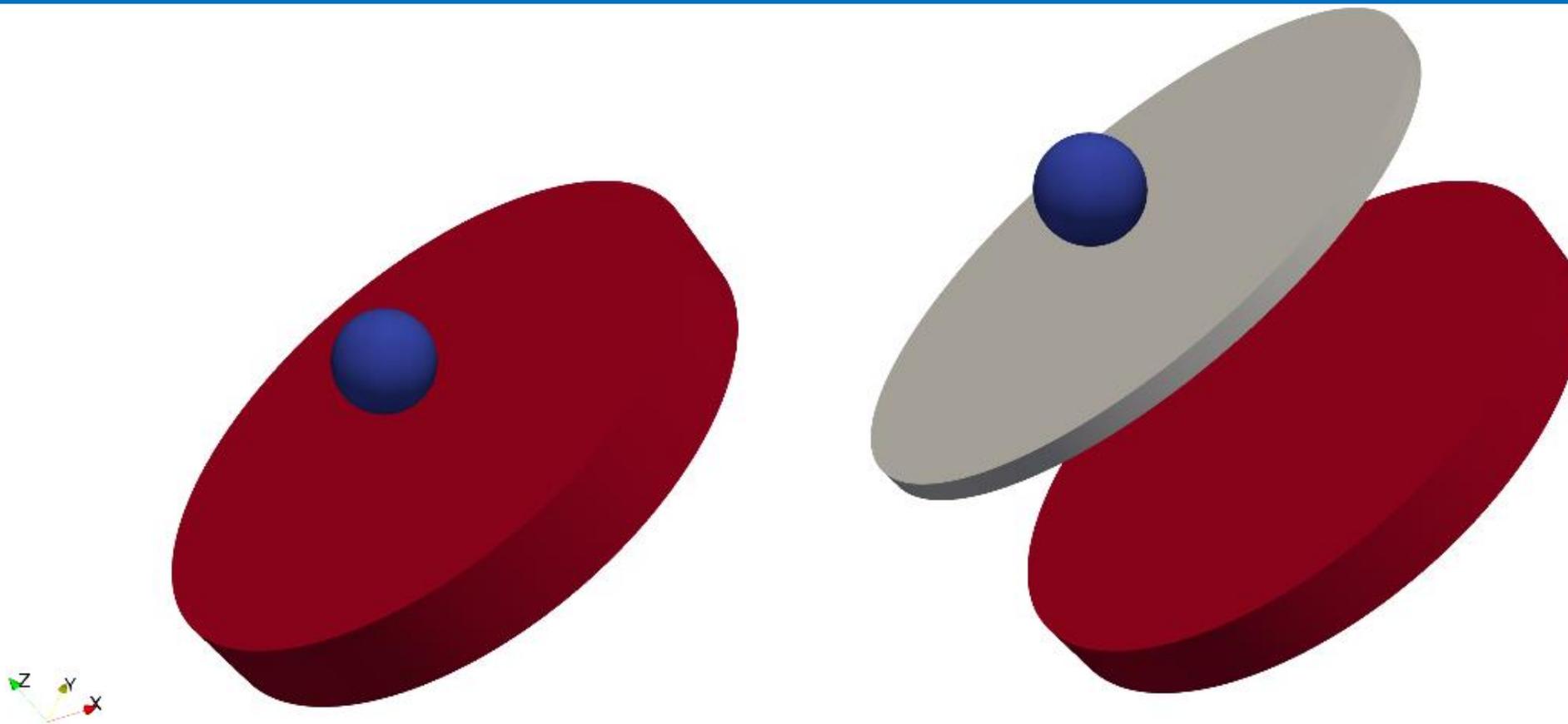
$h = 6,38$  мм



Ударник  $d=3,2$  мм Al  
Преграда 2024-T3 Al  
7400 м/с

$h = 6,61$  мм

C.J. Maiden and A.R. McMillan. An Investigation of the Protection Afforded a Spacecraft by a Thin Shield. *AIAA Journal*, 2(11): 1992–1998, 1964.

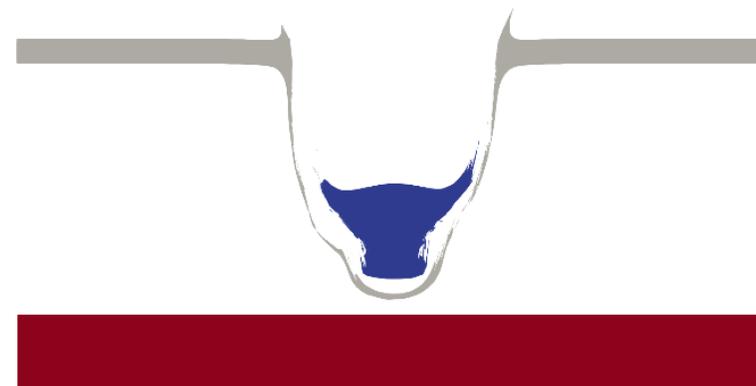


Рассматривается численное моделирование взаимодействия алюминиевой частицы диаметром 5 мм с монолитной преградой из алюминиевого сплава 2024-T3 Al толщиной 4 мм и разнесенной преградой эквивалентной толщины, состоящей из экрана толщиной 1 мм и второй преграды толщиной 3 мм. Расстояние между экраном и второй преградой составляло 10 мм. Рассмотрен диапазон скоростей взаимодействия 3–15 км/с.

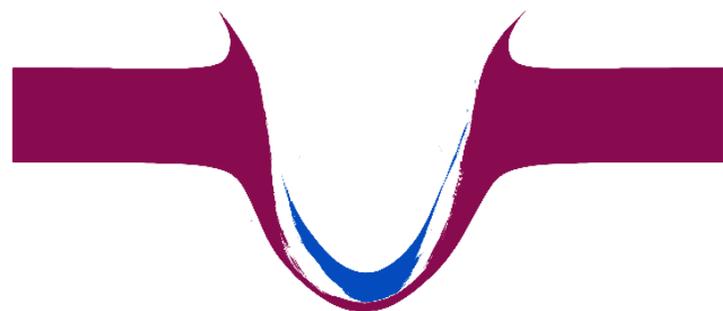
3 км/с



1 мкс



4 мкс

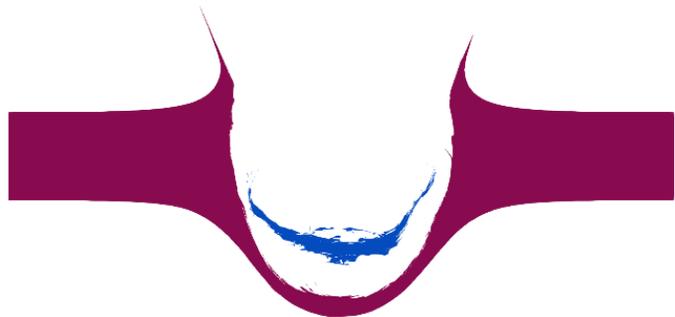


7 мкс



15 мкс

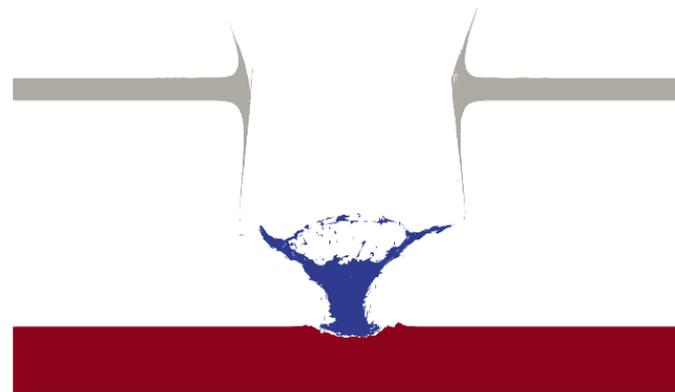
7 км/с



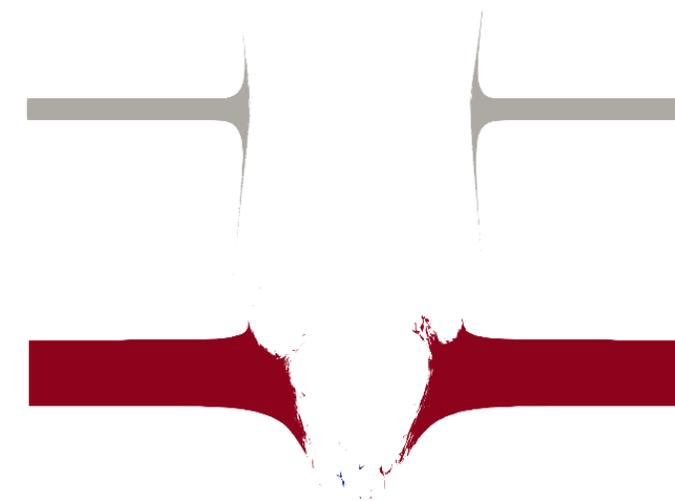
2 мкс



6 мкс

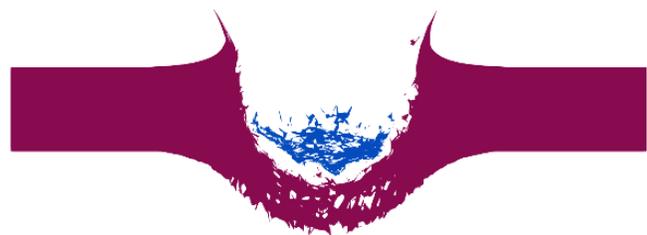


2 мкс

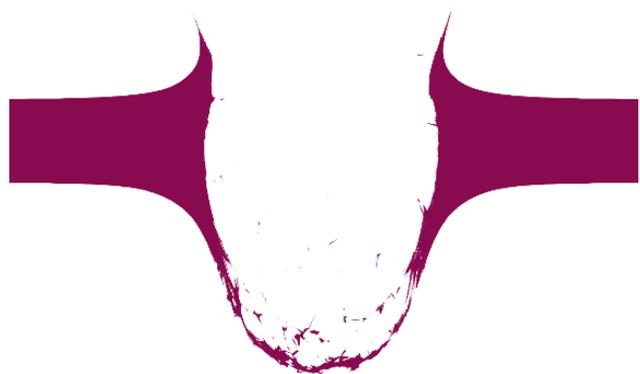


5 мкс

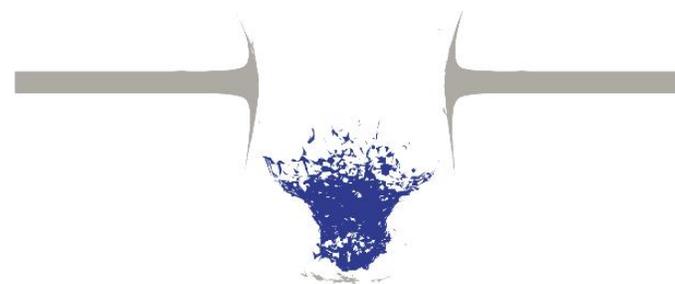
10 км/с



1 мкс



2 мкс

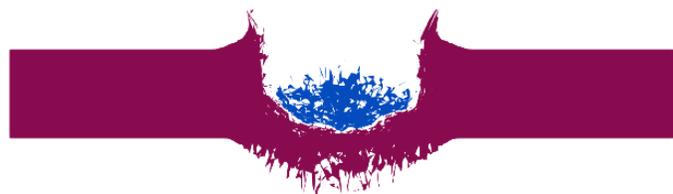


1 мкс

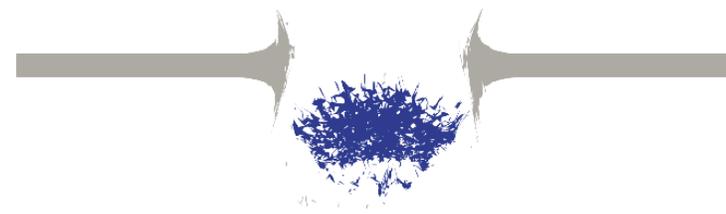


5 мкс

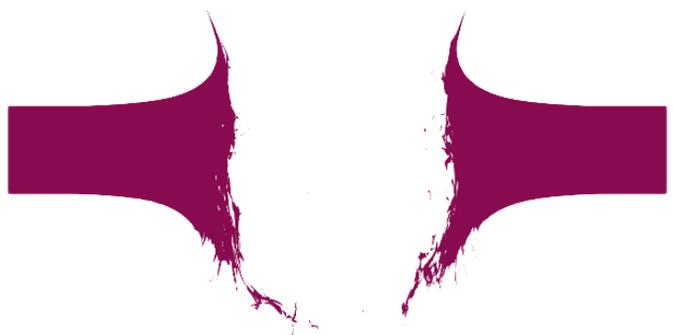
15 км/с



0,5 мкс



0,5 мкс



1,5 мкс



2 мкс

В Таблице представлены значения максимального осевого импульса (импульса, направленного вдоль оси  $Z$ ) потока осколков, образующихся после взаимодействия частицы с монолитной  $I_z^m$  и разнесенной  $I_z^s$  преградами. Значения осевого импульса позволяют оценить поражающую способность осколочного потока. Суммарный осевой импульс осколочного потока определяется соотношением:

$$I_z = \sum_{i=1}^n m_i w_i$$

где  $i$  – общее количество осколков,  $m_i$  – масса  $i$ -го осколка,  $w_i$  – составляющая скорости  $i$ -го осколка по оси  $Z$ , совпадающей с направлением удара.

$v_0, \text{ km/s}$	3	7	10	15
$I_z^m, \text{ N}\cdot\text{s}$	0,27	1,03	1,43	1,47
$I_z^s, \text{ N}\cdot\text{s}$	0,08	0,05	0,03	0

1. Предложенные алгоритмы разрушения и деления элементов расчетной сетки описывают образование новых контактных и свободных границ, и позволяют проводить расчеты в рамках Лагранжева подхода при скоростях взаимодействия до 15 км/с.
2. Тестовые расчеты показали хорошее согласие с экспериментом по конечному результату взаимодействия – глубине кратера.
3. Проведены расчеты по оценке эффективности модельных монолитных и разнесенных защитных экранов. Результаты расчетов подтвердили увеличение эффективности защитных свойств разнесенных конструкций по сравнению с монолитными эквивалентной толщины, с увеличением скорости взаимодействия.
4. В рамках предложенного подхода можно проводить расчеты по оценке эффективности защитных свойств элементов пассивной защиты космических аппаратов.

**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ!**