

XVII Международная конференция «Забабахинские научные чтения»



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



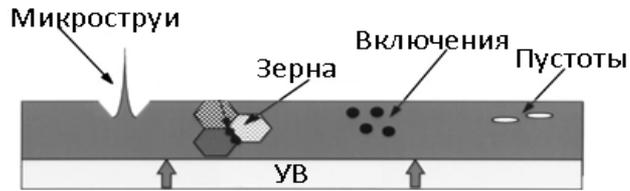
Физический факультет
Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова

Эволюция потока частиц, сформированного в результате ударно- волнового нагружения металлов, в газовых средах

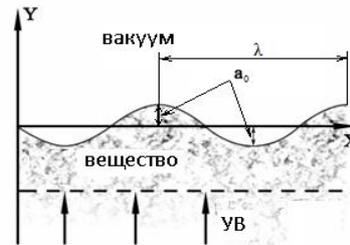
Антипов М.В., Георгиевская А.Б., Карсанова Т.В.,
Полшков Д.А., Пономаренко Д.С., Федосеев А.В.

Механизмы образования частиц

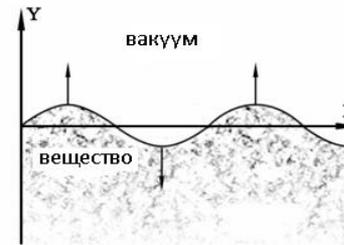
Одним из механизмов разрушения материалов является выброс частиц со свободной поверхности (пыление) после выхода на неё ударной волны. В результате наличия микронеровностей на поверхности развиваются неустойчивые течения.



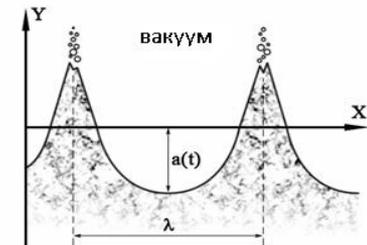
$$\lambda = 10 \div 200 \text{ мкм}, A_0 = 2 \div 40 \text{ мкм}$$



а) начальное состояние



б) стадия роста
возмущений



в) нелинейная стадия
роста струй и их
фрагментация

Цель: апробация физически-обоснованной модели эволюции потока частиц, сформированного в газовой среде в результате ударно-волнового нагружения металла, для различных металлов (свинец, олово) и различных газов (ксенон, гелий, азот).

Задачи:

- Анализ экспериментальных данных по эволюции плотности потока частиц в газовых средах с помощью СИ и протонографии [1, 2];
- Проведение расчетов параметров «источника» ударно-индуцированного «пыления» образцов из олова и свинца для моделируемых экспериментов;
- Проведение численного моделирования экспериментов и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными;
- Анализ данных по изменению спектра размеров частиц, полученных при проведении численного моделирования, с течением времени.

[1] Замыслов Д. Н., Панов К. Н., Георгиевская А. Б. и др. Эволюция параметров потока частиц в ксеноне при ударно-волновом нагружении свинца нестационарной ударной волной амплитудой 43 ГПа. // Труды Международной конференции «XXI Харитоновские тематические научные чтения». ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – 2019. – С. 156-164.

[2] И. А. Тен, Э.Р. Прууэл, А.О. Кашкаров, И.А. Рубцов, М.В. Антипов, А.Б. Георгиевская и др. Регистрация выброса частиц из ударно-нагруженных металлов методами СИ. // Труды Международной конференции «XIX Харитоновские тематические научные чтения». ФГУП «РФЯЦВНИИЭФ». – 2017. – С. 204-211.

Модель эволюции потока частиц, сформированного в результате ударно-волнового нагружения, в газовой среде

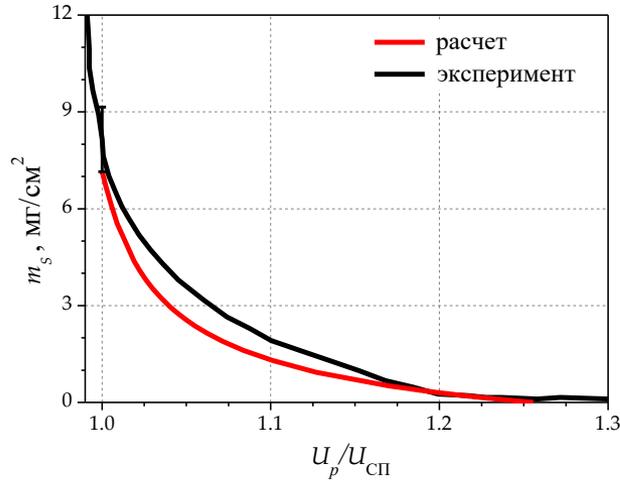
В основе модели лежат следующие принципы:

- «Источник» ударно-волнового «пыления» и «первичный» спектр размеров частиц подчиняются модели [1];
- Частицы дробятся в соответствии с законами дробления одиночной жидкой частицы в газовом потоке, калиброванных на современных экспериментальных данных [2].

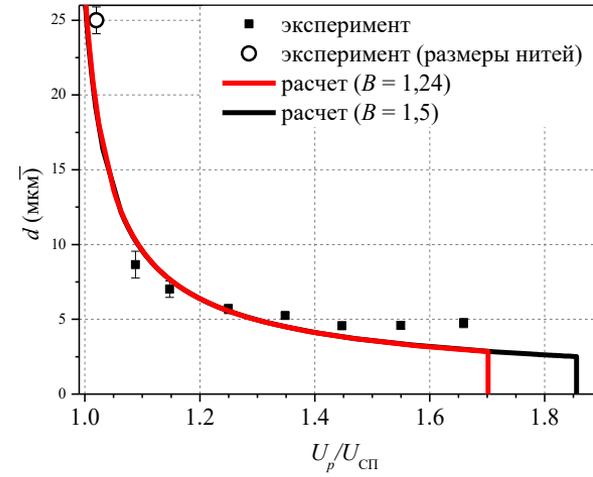
[1] A.B. Georgievskaya, V.A. Raevskiy. A Model of a Source of Shock Wave Metal Ejection Based on Richtmyer – Meshkov Instability Theory.// Journal of Dynamic Behavior of Materials. Volume 3. Issues 2.– 2017. С. 321-333.

[2] К. В. Анисифоров, А. Б. Георгиевская, Е. В. Левкина и др. Расчетно-экспериментальное исследование процесса дробления капли жидкости под действием воздушной ударной волны. // ЖЭТФ Т. 167 №11

Модель «источника»



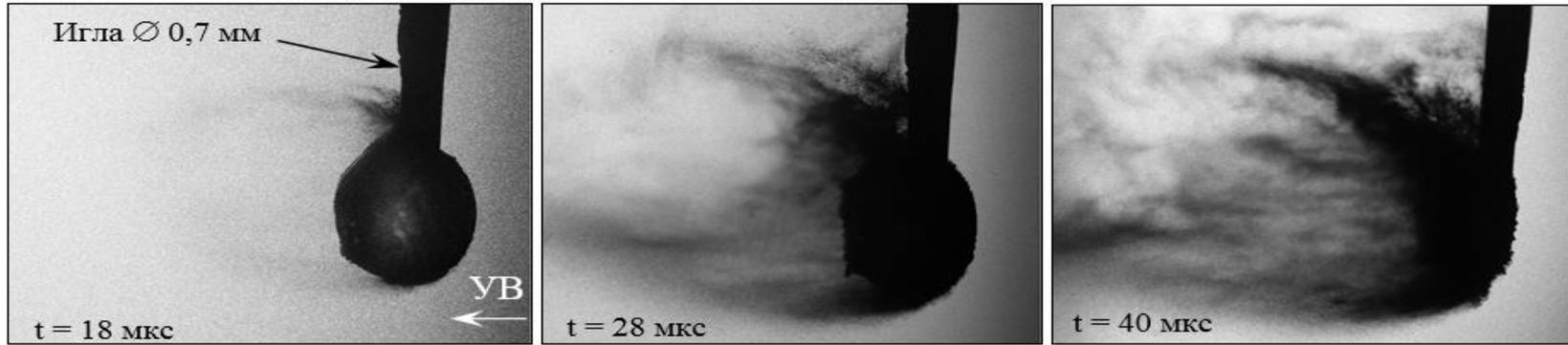
Зависимость выброшенной массы частиц от отношения средней скорости в облаке к скорости СП образца



Связь характерного размера частиц с их скоростью
(отношением скорости частиц к скорости СП образца)

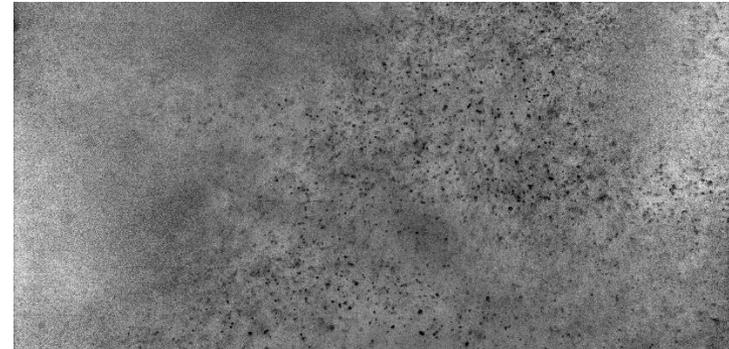
[1] A.B. Georgievskaya, V.A. Raevskiy. A Model of a Source of Shock Wave Metal Ejection Based on Richtmyer – Meshkov Instability Theory.// Journal of Dynamic Behavior of Materials. Volume 3. Issue 2.– 2017. С. 321-333.

Механизм разрушения единичной капли в потоке газа



$$Re=10^3-10^5, La=0,4-6,4 \times 10^6, We=35-14000$$

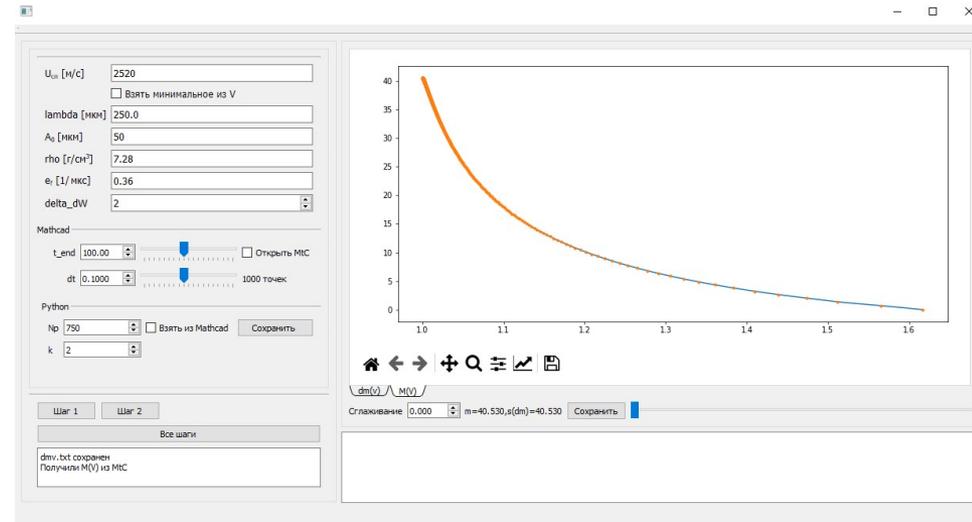
[2] К. В. Анисифоров, А. Б. Георгиевская, Е. В. Левкина и др. Расчетно-экспериментальное исследование процесса дробления капли жидкости под действием воздушной ударной волны. // ЖЭТФ Т. 167 №11



Численная реализация модели с использованием методики LAMP

LAMP (Lagrange Multiphase Program) разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ (Гамов А.Л., Пономаренко Д.С.) - одномерный численный решатель уравнений газодинамики многофазной сплошной среды в одномерном приближении.

Методика позволяет решать задачи совместного движения сплошной среды (газов, жидких сред) и дисперсной фазы, представляющей собой поток мелкодисперсных частиц, образованных после воздействия интенсивных ударных нагрузок.



Окно графического интерфейса

Численная реализация модели с использованием методики LAMP

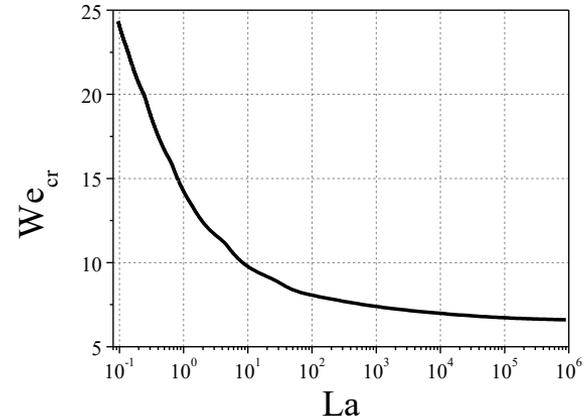
Для того, чтобы определить, как характеристики «источника» пыления трансформируются во времени при наличии газовой среды, в библиотеку LAMP были внесены следующие изменения:

1. Введен новый критерий дробления [1]:

$$\bar{d} = \xi^3 \sqrt{\frac{\sigma d_0^2}{\rho_{sw} V_g^2}} = \xi d_0 (We)^{-1/3}, \quad \bar{d} \leq d_0$$

2. Скорректировано время дробления частиц:

$$t_f \approx \frac{4d_0}{V_g} \sqrt{\frac{\rho_0}{3\rho_{sw} C_x C_f^2}};$$

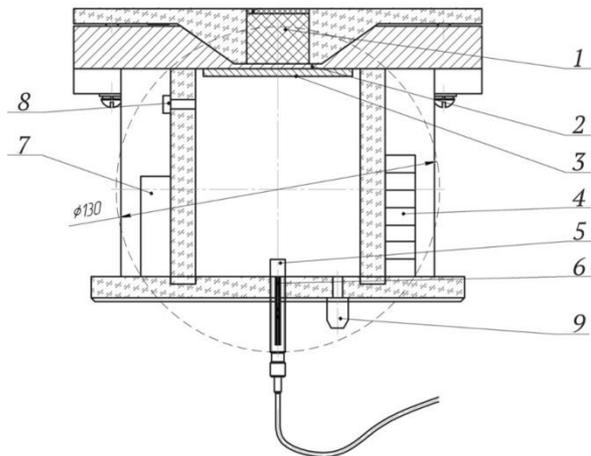


3. Изменено значение критического числа Вебера [2].

[1] К. В. Анисифоров, А. Б. Георгиевская, Е. В. Левкина и др. Расчетно-экспериментальное исследование процесса дробления капли жидкости под действием воздушной ударной волны. // ЖЭТФ Т. 167 №11

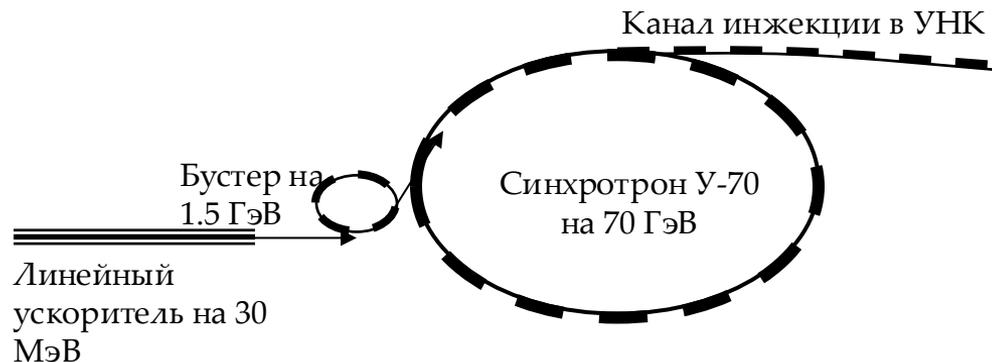
[2] Б.С. Дорогов. Эрозия лопаток в паровых турбинах. Изд-во «Энергия». Москва. 1965.

Эксперимент РФЯЦ-ВНИИЭФ



- 1 – заряд, 2 – сталь, 3 – образец
(свинец),
4 – оптический клин, 5 –
пьезодатчики,
6 – датчики PDV, 7 – оптический
клин,
8 – винт для прокачки газа,
9 – штуцер для закачки газа

$P \sim 43$ ГПа, $A_0 \approx 45$ мкм, $\lambda \approx 300$ мкм



ГУ и характеристики «источника»

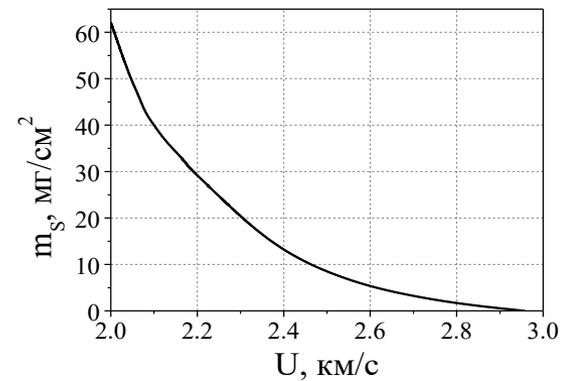
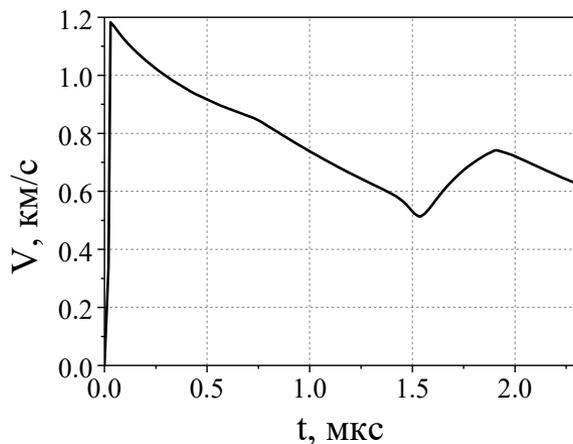
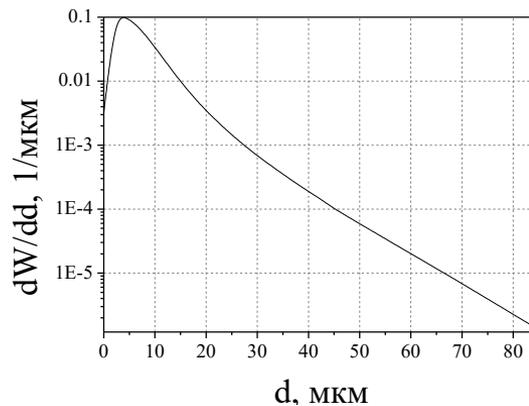


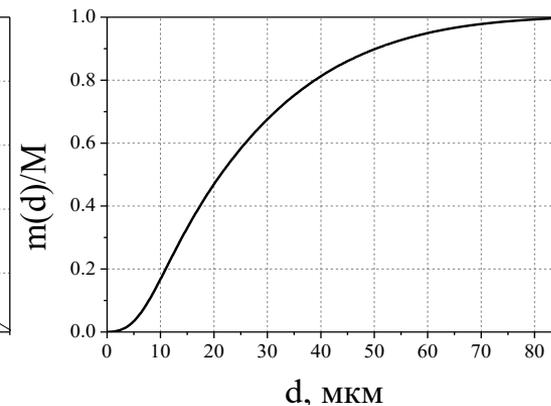
Схема постановки задачи



Граничное условие $V(t)$



d, мкм

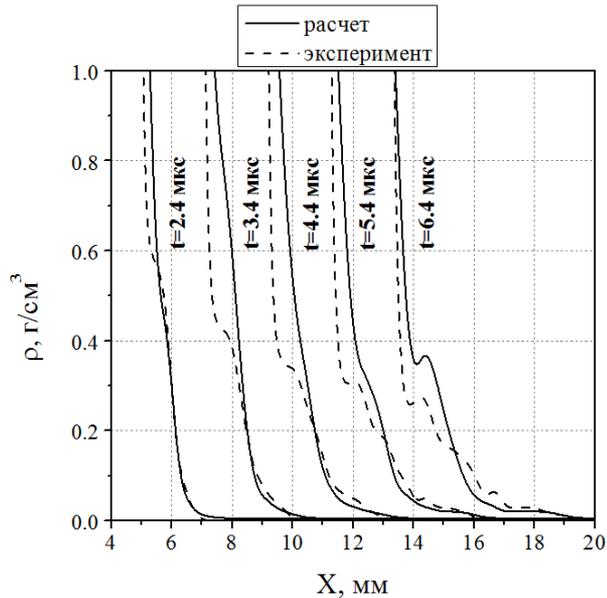


d, мкм

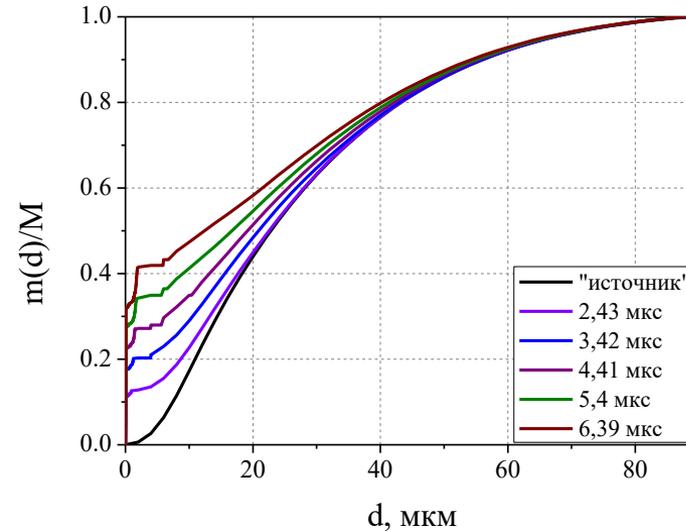
Характеристики «источника»

Результаты (Протонография)

Pb и Xe (1 атм), $\rho_{Xe}(1 \text{ атм}) \approx 0,0055 \text{ г/см}^3$



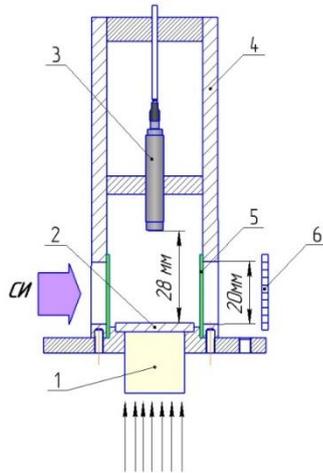
Сравнение с экспериментом
распределения плотности потока
частиц вдоль направления
движения ($t_{break} = 1,9; \xi = 0,3$)



Изменение интегрального
распределения массы частиц
по размерам со временем

Эксперимент ИЯФ СО РАН и ВНИИЭФ на ВЭПП-3

$P \sim 44$ ГПа, $A_0 \approx 20$ мкм, $\lambda \approx 110$ мкм



- 1 – деталь из пластифицированного октогена $\varnothing 20 \times 20$ мм;
- 2 – оловянный диск $\varnothing 20 \times 3$ мм;
- 3 – пьезоэлектрический датчик;
- 4 – корпус; 5 – лавсан;
- 6 – детектор СИ DIMEX

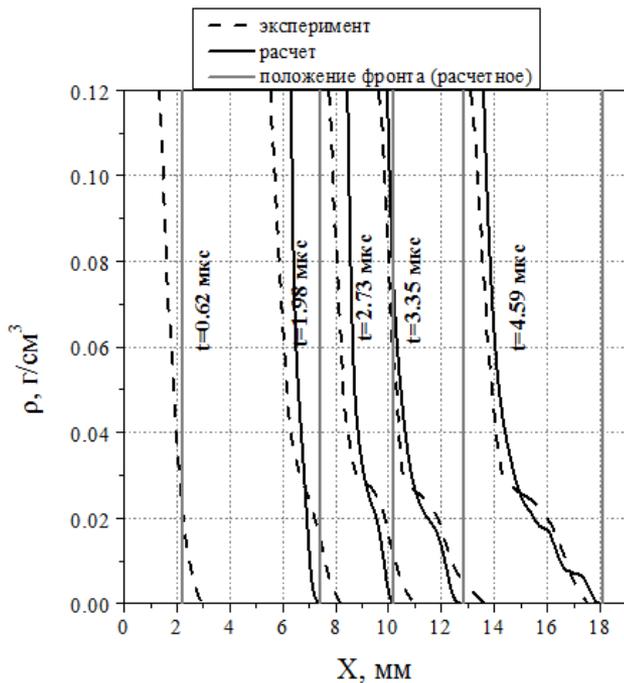


Станция «Взрыв» на ускорителе ВЭПП-3

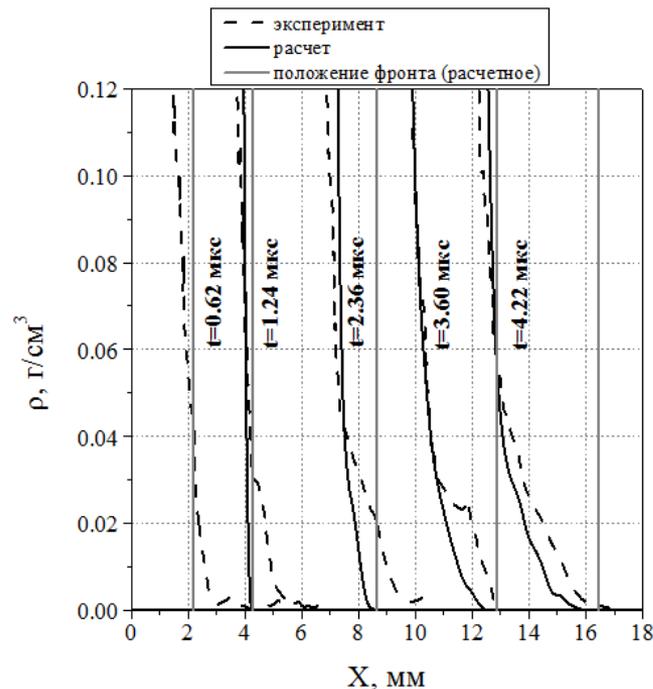
И. А. Тен, Э.Р. Пруэл, А.О. Кашкаров, И.А. Рубцов, М.В. Антипов, А.Б. Георгиевская и др. Регистрация выброса частиц из ударно-нагруженных металлов методами СИ. // Труды Международной конференции «XIX Харитоновские тематические научные чтения». ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ». – 2017. – С. 204–211.

Результаты (СИ)

Sn



He (2 атм)

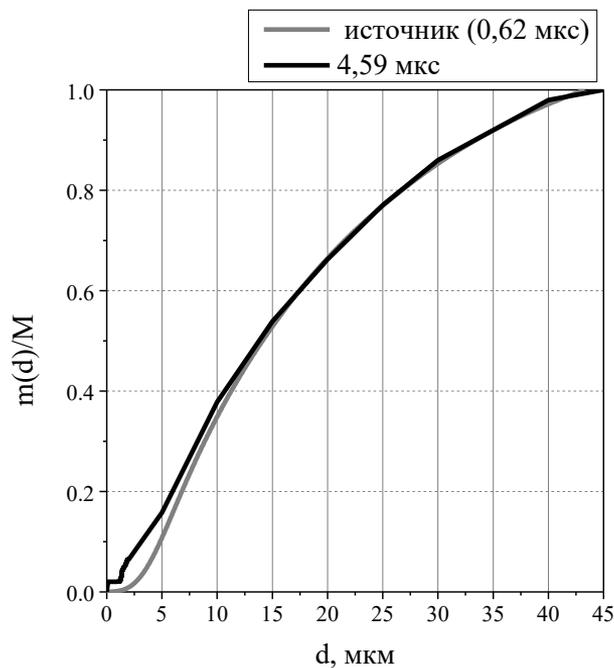


He (8 атм)

Сравнение с экспериментом распределения плотности
потока частиц вдоль направления движения

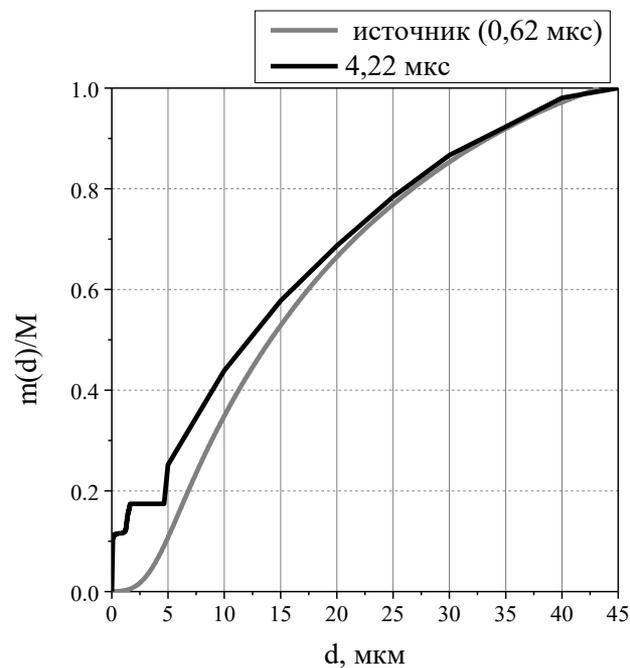
Результаты (СИ)

$$\rho_{\text{He}}(2 \text{ атм}) \approx 0,000368 \text{ г/см}^3$$



He (2 атм)

$$\rho_{\text{He}}(8 \text{ атм}) \approx 0,001472 \text{ г/см}^3$$

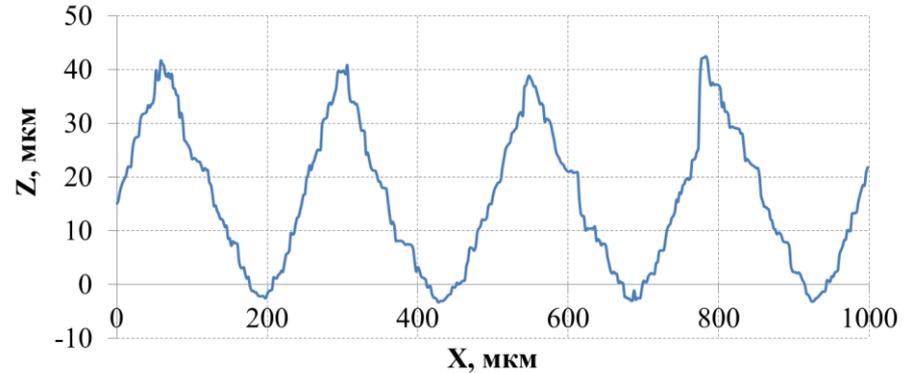
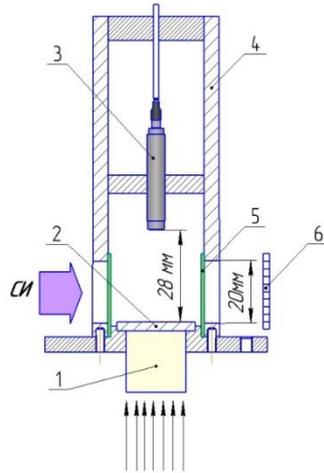


He (8 атм)

Изменение интегрального распределения массы частиц по
размерам со временем

Эксперимент ВНИИЭФ на ВЭШ-3

$P \sim 45$ ГПа, $A_0 \approx 50$ мкм, $\lambda \approx 250$ мкм

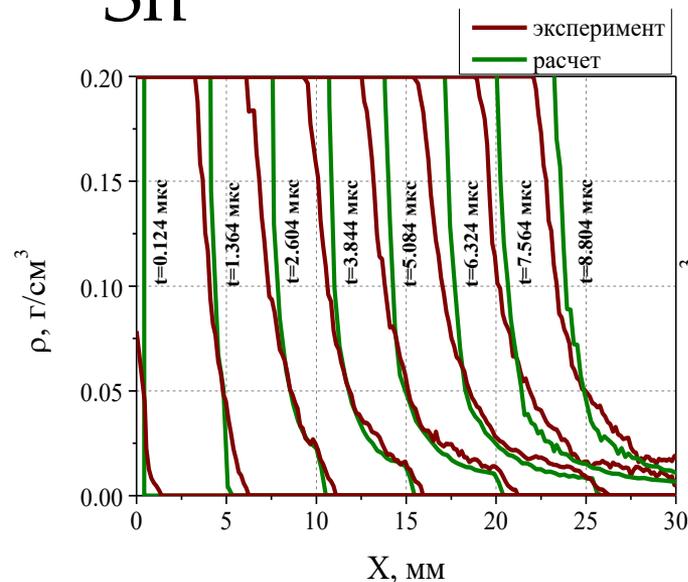


- 1 – деталь из пластифицированного октогена $\varnothing 20 \times 20$ мм;
- 2 – оловянный диск $\varnothing 20 \times 3$ мм;
- 3 – пьезоэлектрический датчик;
- 4 – корпус; 5 – лавсан;
- 6 – детектор СИ DIMEX

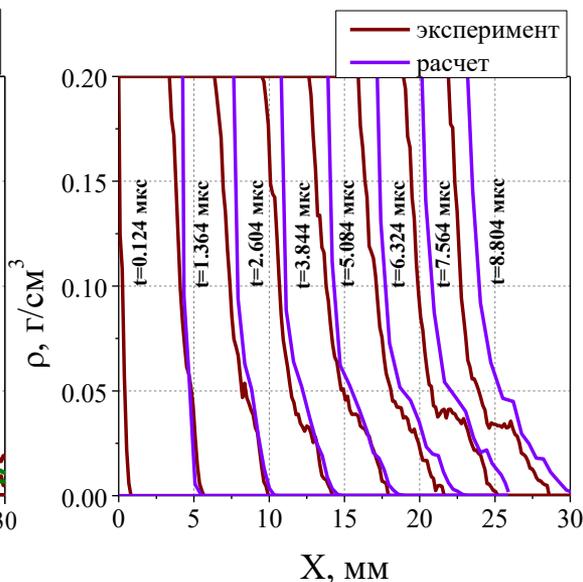
Профилограмма одного из образцов

Результаты (СИ)

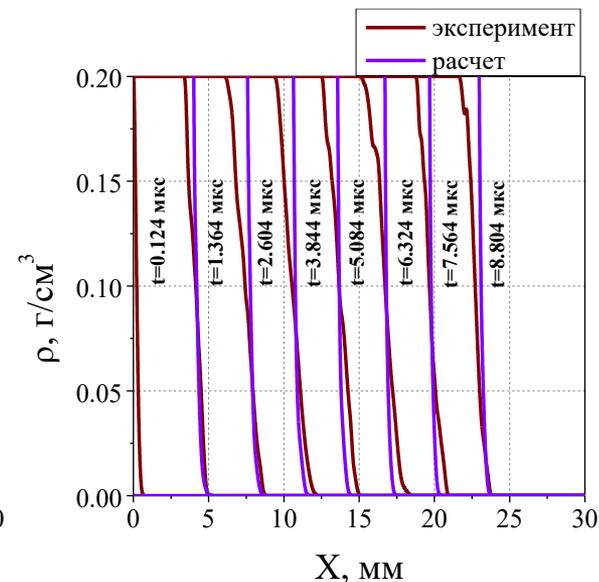
Sn



вакуум



N_2 (1 атм)

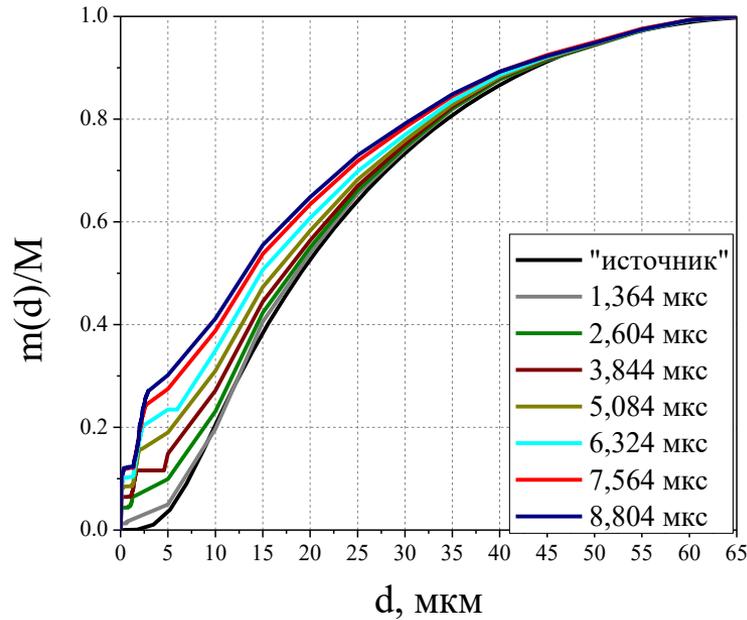


N_2 (8 атм)

Сравнение с экспериментом распределения плотности
потока частиц вдоль направления движения

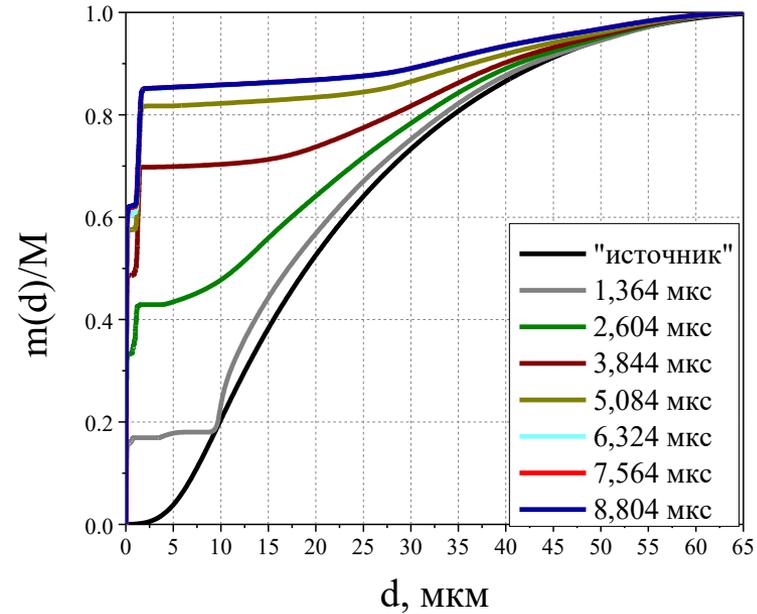
Результаты (СИ)

$$\rho_{N_2} (1 \text{ атм}) \approx 0,001123 \text{ г/см}^3$$



N_2 (1 атм)

$$\rho_{N_2} (8 \text{ атм}) \approx 0,008984 \text{ г/см}^3$$



N_2 (8 атм)

Изменение интегрального распределения массы частиц по
размерам со временем

Выводы

- Получено удовлетворительное описание экспериментов с помощью модели эволюции потока частиц в газовой среде;
- Продемонстрировано, что модель обладает прогностическими способностями, связанными с изменением спектра размеров частиц с течением времени.