

Экспериментально-расчётное исследование пыления и оценки откольной прочности свинца по данным лазерно-гетеродинной диагностики

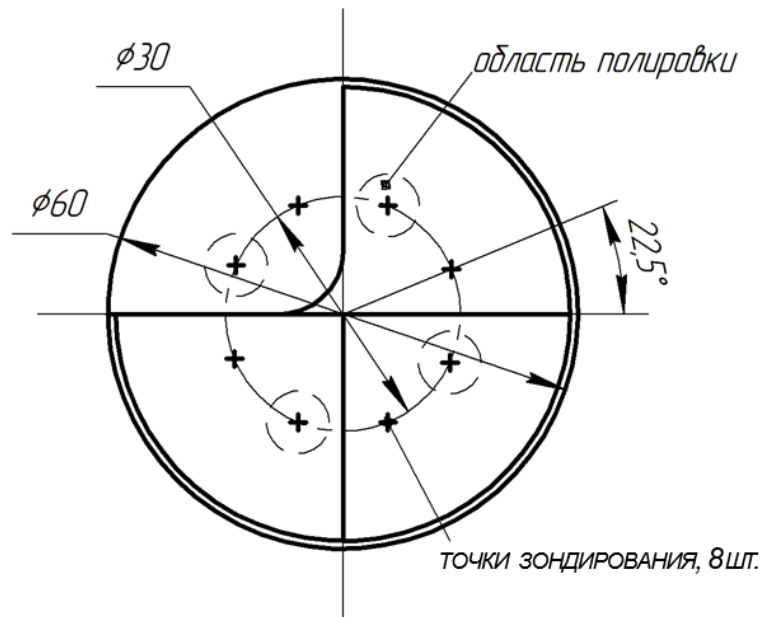
Е. А. Козлов¹, Д. П. Кучко¹, Р. В. Комаров¹, М. А. Ральников¹, О.
В. Ткачёв¹, А. Е. Широбоков¹, С. А. Дьячков², **А. Н. Кондратьев²**,
С. Е. Куратов², Д. Б. Rogozкин^{2,3}, А. А. Серёжкин².

1 ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина

2 ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова

3 НИЯУ МИФИ

Постановка эксперимента



Исследование процессов пыления при ударном нагружении пластин Рв с различной шероховатостью поверхности

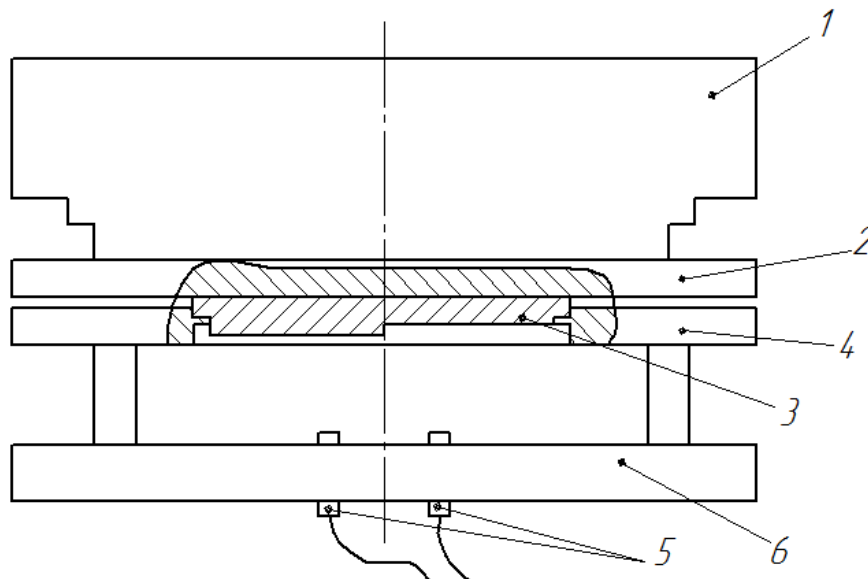


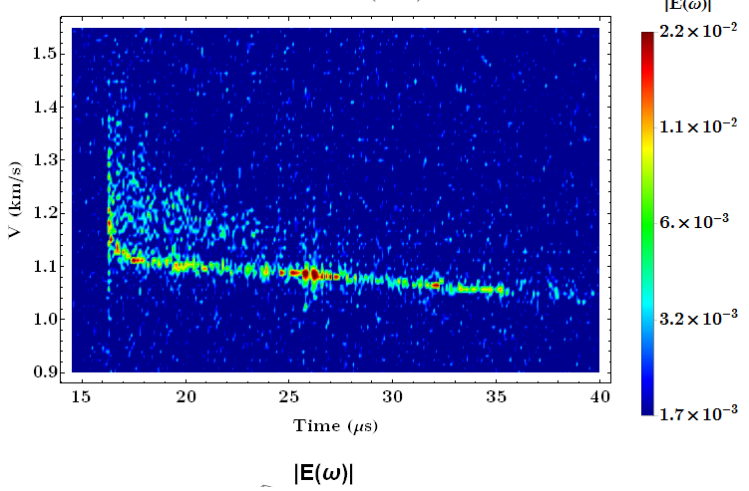
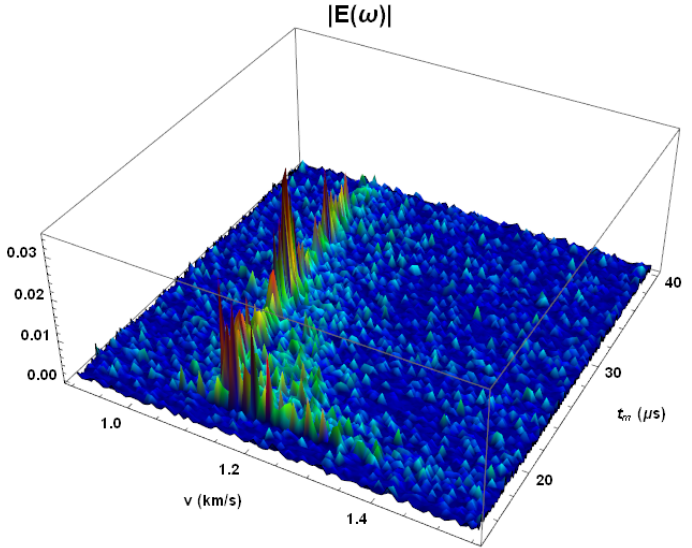
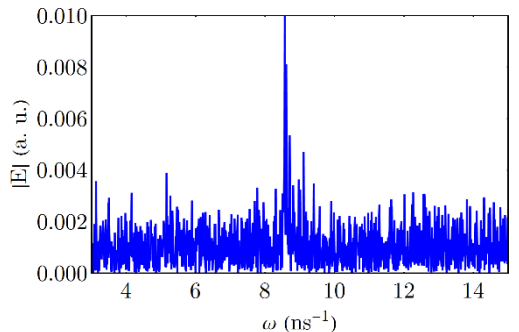
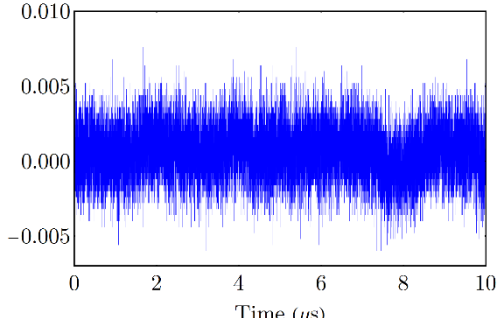
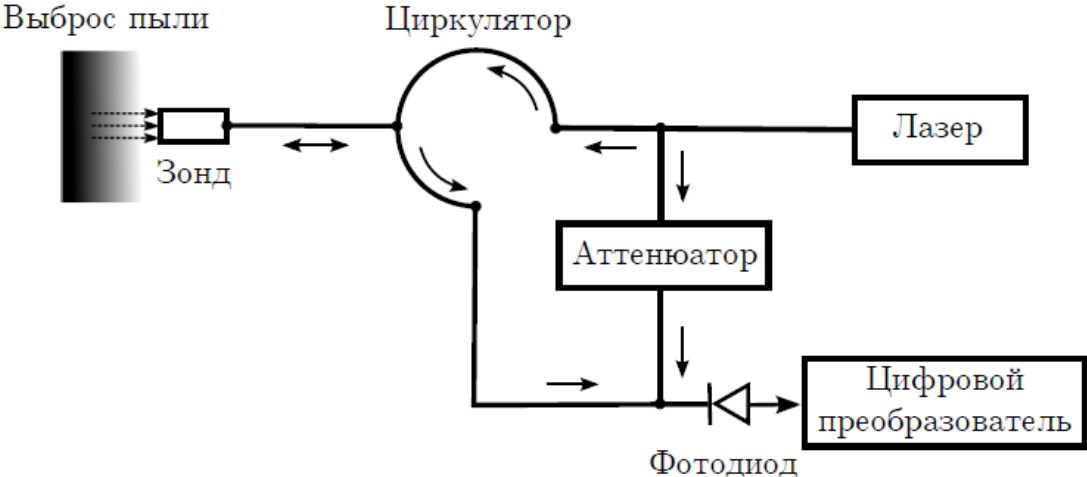
Схема взрывной сборки:

- 1 – нагружающее устройство
- 2 – стальной экран
- 3 – свинцовый образец
- 4 – стальная обойма
- 5 – коллиматоры
- 6 – держатели коллиматоров

Оптические гетеродинные доплеровские (PDV) измерения

Схема PDV-измерений

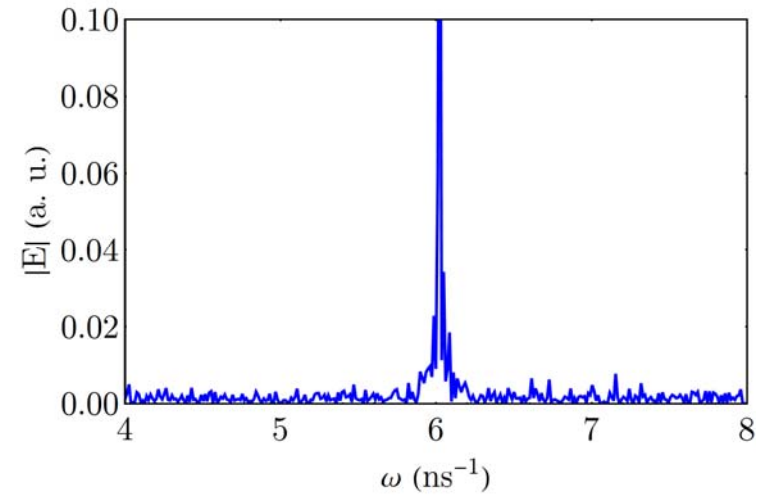
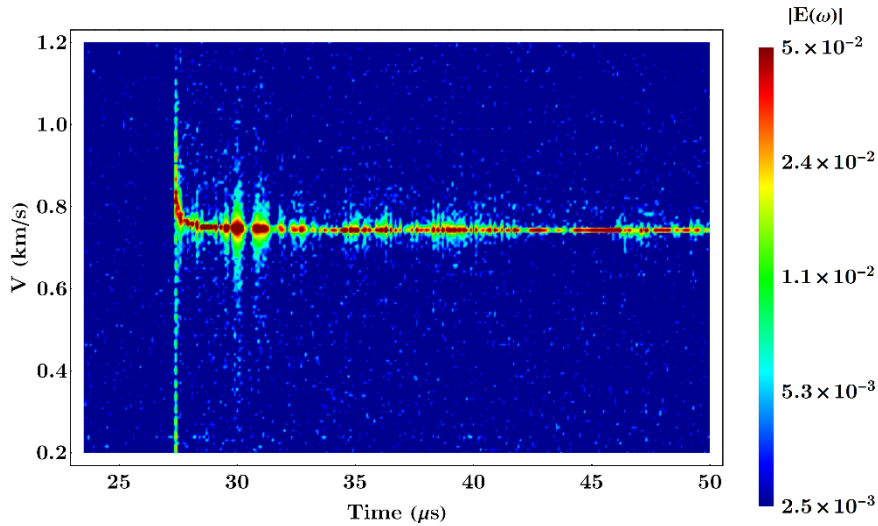
$$I(t) = I_0 + \sum I_k + 2\sum \sqrt{I_0 I_k} \cos(\omega_k t + \varphi_k)$$



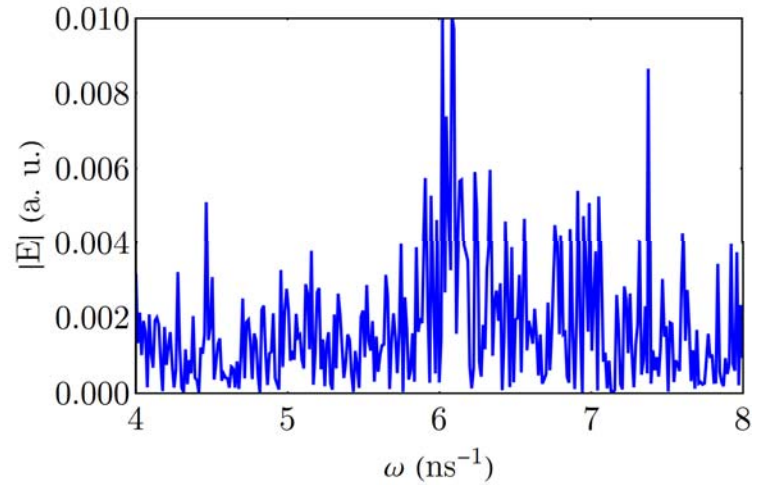
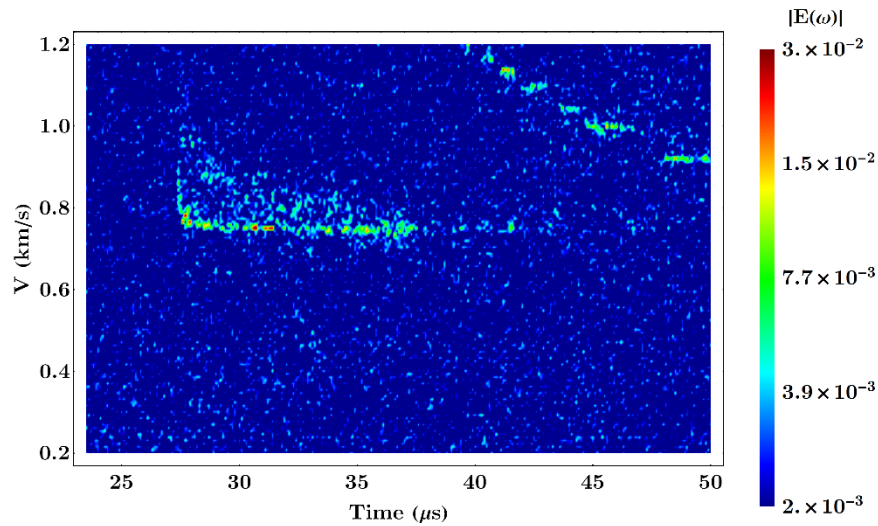
O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez, Rev. Sci. Instruments 77, 083108 (2006)

Данные PDV-измерений в экспериментах по пылению Рb

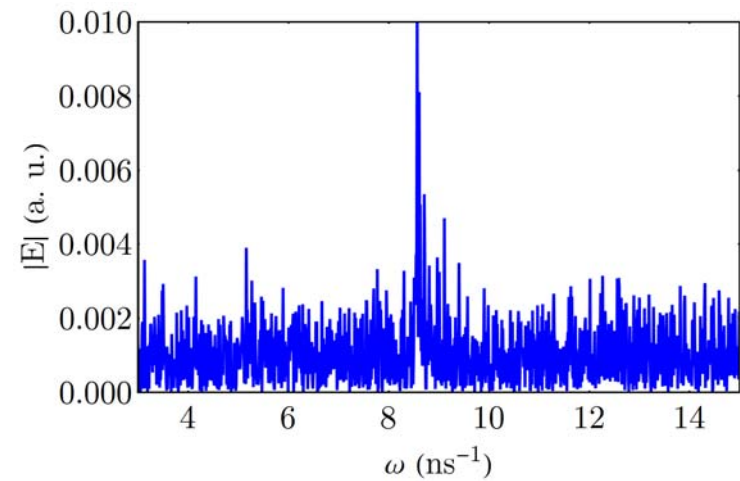
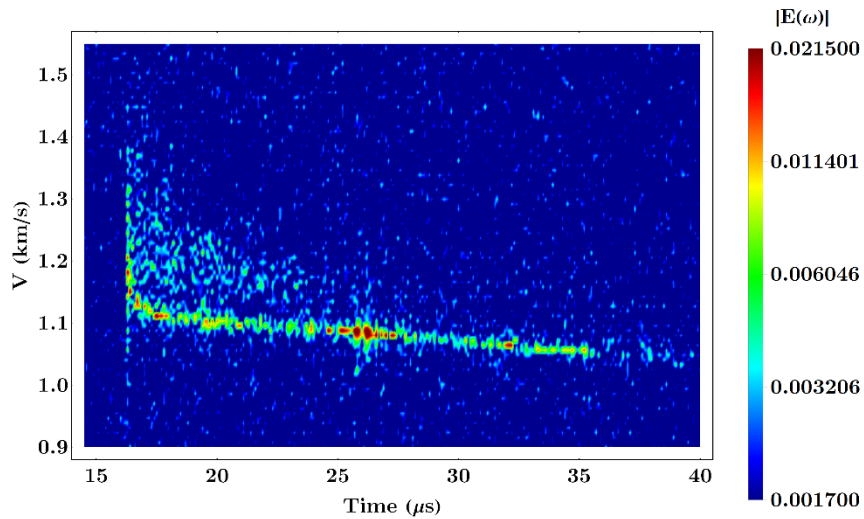
$P_{yB} = 12$ ГПа, $R_z = 0.96$ мкм



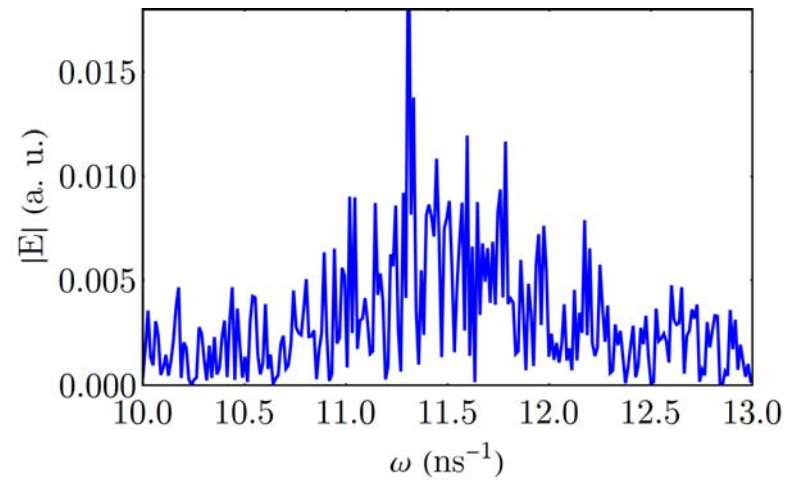
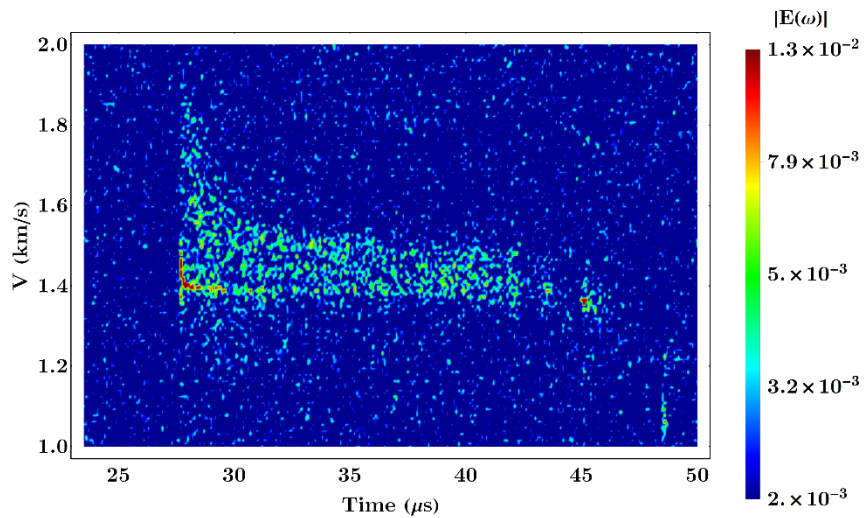
$P_{yB} = 12$ ГПа, $R_z = 4.7$ мкм



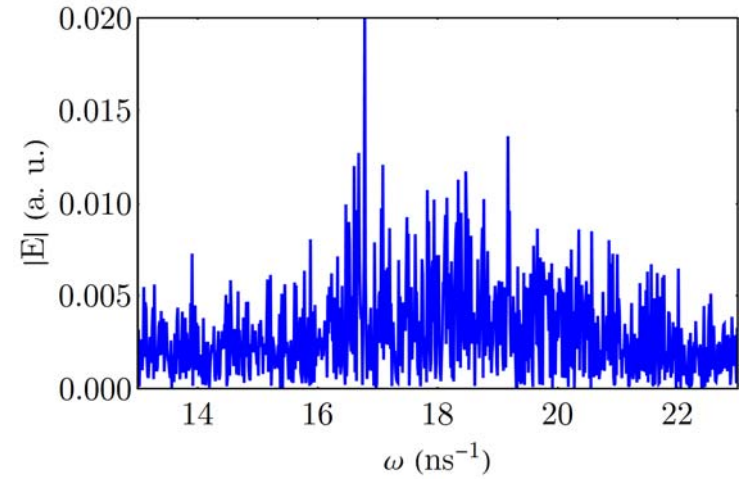
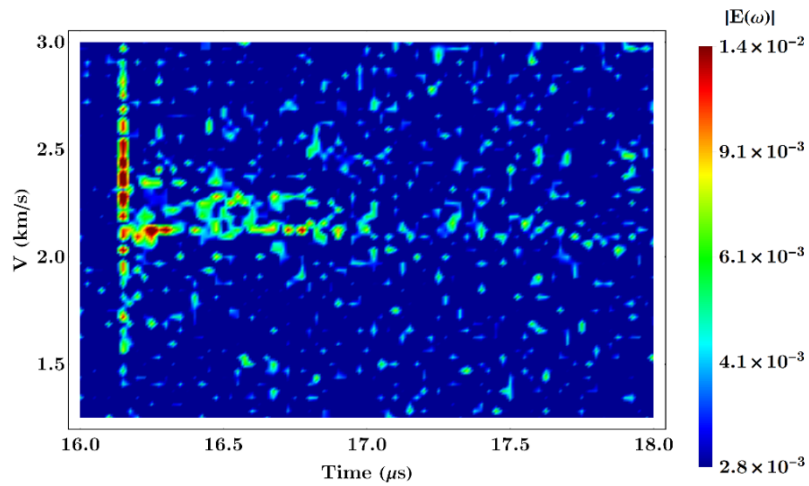
$$P_{yB} = 19 \text{ ГПа}, R_z = 0.96 \text{ мкм}$$



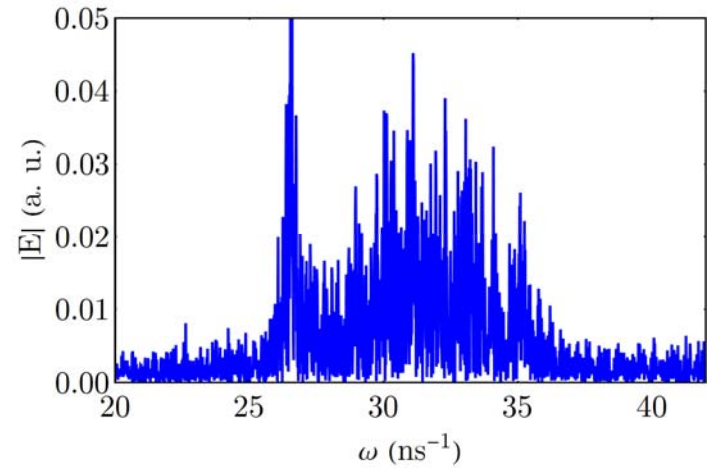
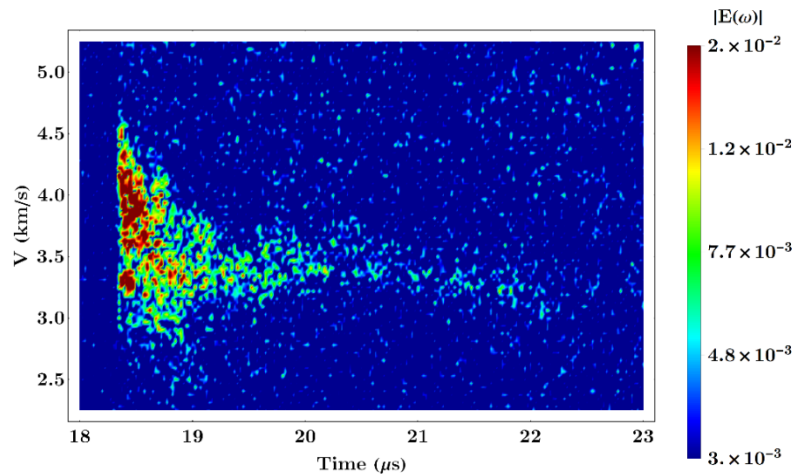
$$P_{yB} = 23 \text{ ГПа}, R_z = 4.82 \text{ мкм}$$



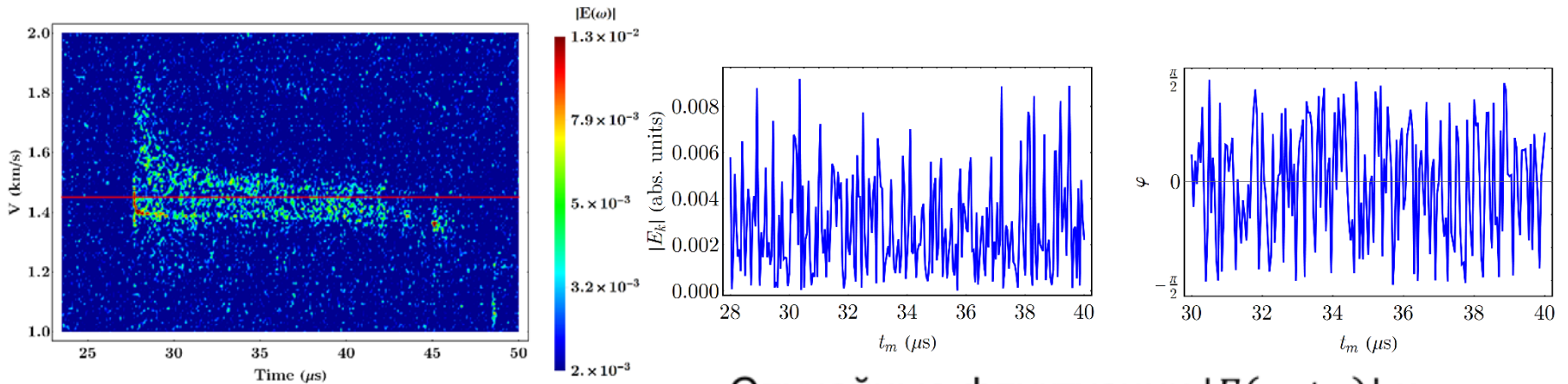
$P_{yB} = 41 \text{ ГПа}$



$P_{yB} = 83 \text{ ГПа}$



Подход к интерпретации PDV-данных



Случайные флуктуации $|E(\omega, t_m)|$ и $\varphi = \arg|E(\omega, t_m)|$ как функции t_m

Характерный временной масштаб вариаций спектра: $\delta t_m \sim t_m \frac{\Delta\omega}{\omega_s}$

- ❑ Флуктуации $|E(\omega)|$ (по данным экспериментов) подчиняются гауссовой статистике $\langle |E(\omega)|^{2n} \rangle = n! \langle |E(\omega)|^2 \rangle^n$, $\langle \dots \rangle$ - усреднение по времени движения t_m
- ❑ Экспериментальные данные для $|E(\omega)|^2$ сравниваются с теоретическим расчетом на основе транспортного уравнения

$$(n\nabla + \sigma + \kappa)I(\mathbf{r}, \mathbf{n}, t) = \sigma \int d\mathbf{n}' p(\mathbf{n}, \mathbf{n}') \langle \exp[ik(\mathbf{n} - \mathbf{n}')vt] \rangle I(\mathbf{r}, \mathbf{n}', t)$$

- ❑ Обработка экспериментальных данных – усреднение по времени t_m на «квазистационарном» участке Δt_m , $|E(\omega)|^2 \rightarrow \langle |E(\omega)|^2 \rangle$

Модель среды

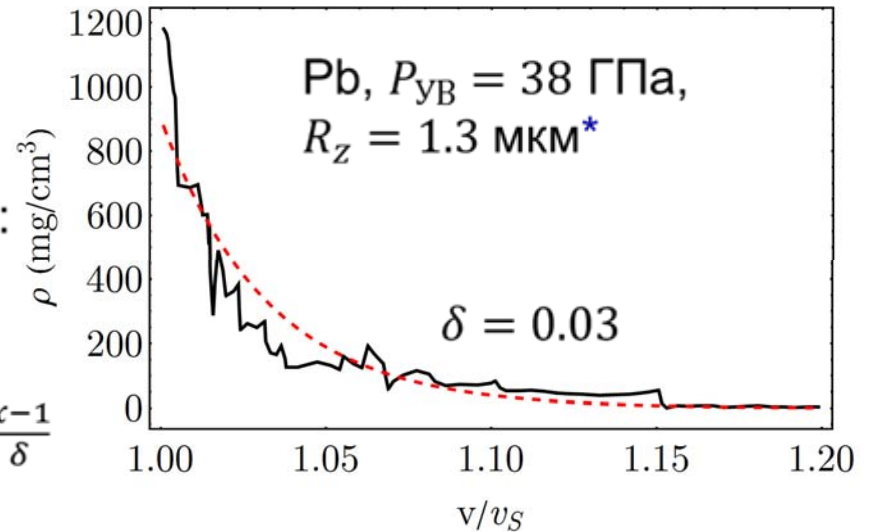
Автомодельная временная эволюция распределения объёмной плотности в пылевом облаке

$$\rho(v, t_m) = \frac{\rho_a}{v_S t_m} F\left(\frac{v}{v_S}\right)$$

Показатель рассеяния пылевого облака:

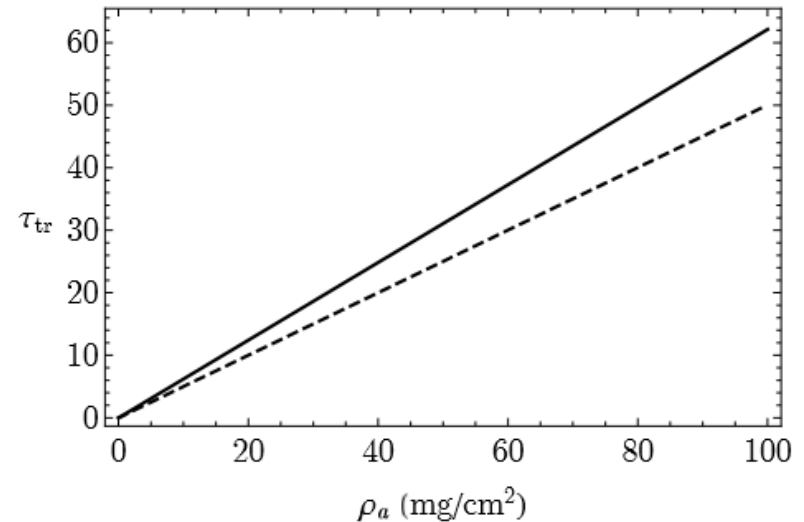
$$\sigma(v) = \frac{\tau}{v_S} F\left(\frac{v}{v_S}\right)$$

Экспоненциальная модель $F(x) = \frac{1}{\delta} e^{-\frac{x-1}{\delta}}$



Связь оптической толщины τ с поверхностной плотностью пыления ρ_a (расчёт по теории Ми** с распределениями частиц по размерам по данным***)

$\rho_a = 10 \div 80$ мг см⁻² в зависимости от v_S
 $\rho_a < 6$ мг см⁻²(microjetting)



*W. T. Buttler et al. J. Appl. Phys. 111, 053509 (2012)

**www.philiplaven.com

*** D. S. Sorenson et al. Technical Report LA-UR-14-24722, LANL (2014)

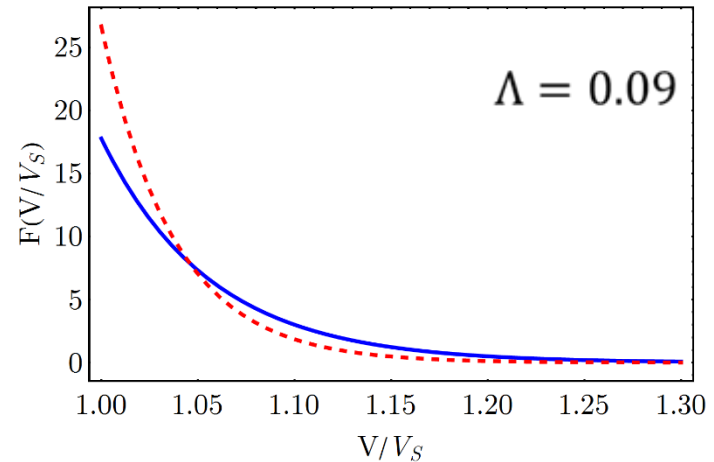
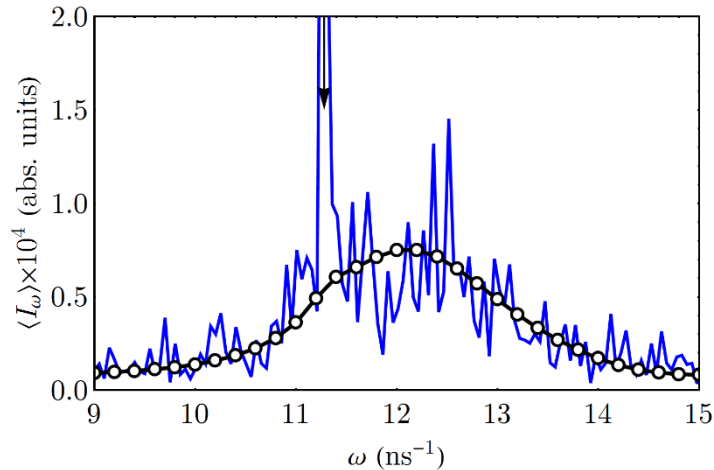
Обработка и интерпретация экспериментальных данных

Усреднение N спектров на «квазистационарных участках»:

$$\langle I_\omega \rangle = \langle |E(\omega)|^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_n^N |E(\omega)|_n^2$$

$$P_{yB} = 23 \text{ ГПа}, R_a = 0.86 \text{ мкм}$$

Λ – альбеде однократного рассеяния



$$t_m = 28.5 \div 29.4 \text{ мкс}, \Delta t_m = 0.125 \text{ мкс}$$

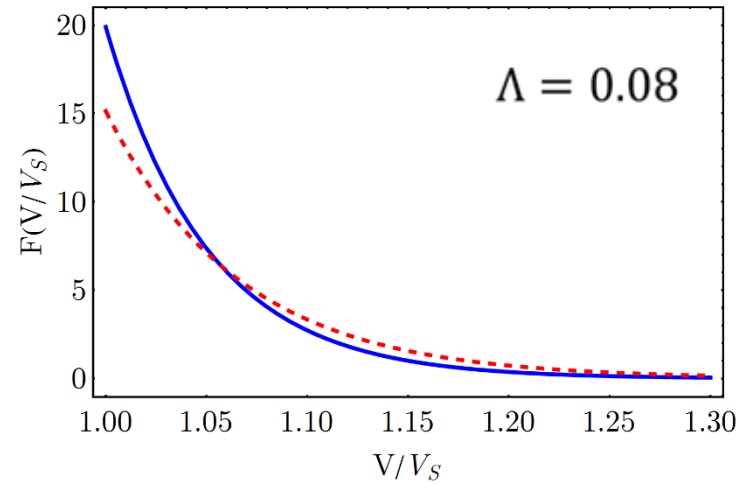
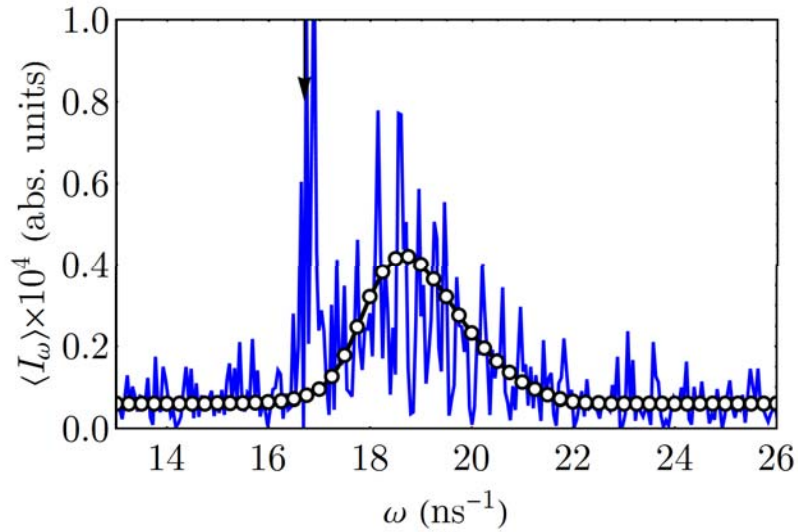
$$\delta = 0.05 \div 0.07$$

$$v_S = 1.38 \text{ км/с}, \tau = 2.5, \rho_a = 4 \text{ мг см}^{-2}$$

Расчёт откольной прочности в гидродинамическом приближении
 $\sigma_{spall} = 1/2 \times \rho_0 \times c_0 \times \Delta V$ (Е.И. Забабахин, Некоторые вопросы газодинамики взрыва, Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1987)

$$h = 6 \text{ мм} \quad \sigma_{spall} = 0.5 \times 11.3 \times 2.0 \times 0.073 = 0.83 \text{ ГПа}$$

$$P_{\text{yB}} = 41 \text{ ГПа}, R_a = 0.6 \text{ мкм}$$

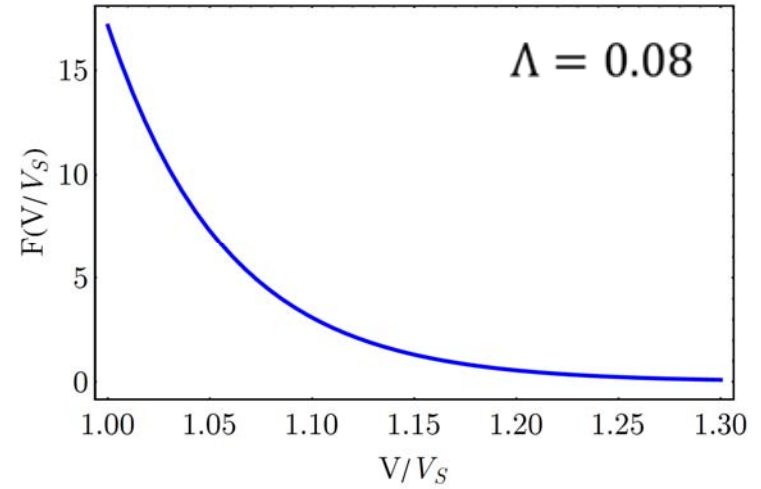
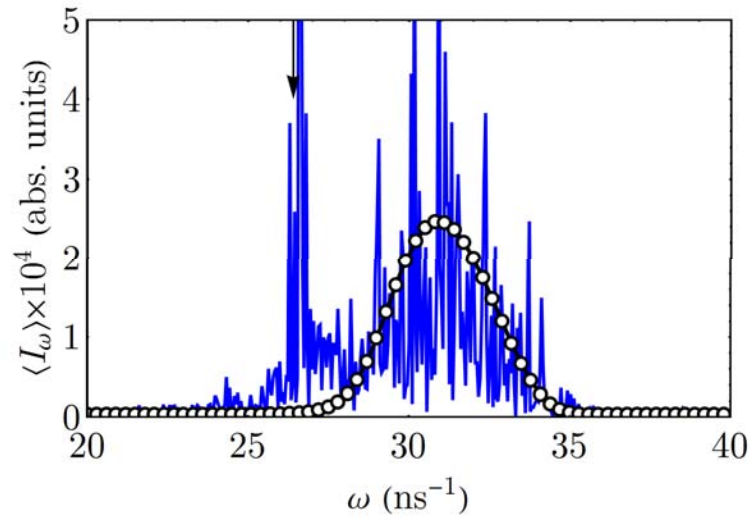


$$t_m = 16.1 \div 16.5 \text{ мкс}, \Delta t_m = 0.125 \text{ мкс}$$

$$\delta = 0.06 \div 0.08$$

$$v_S = 2.06 \text{ км/с}, \tau = 4 \div 5, \rho_a = 18 \text{ мг см}^{-2}$$

$$P_{yB} = 83 \text{ ГПа}, R_a = 0.6 \text{ мкм}$$



$$t_m = 18.5 \div 19 \text{ нс}, \Delta t_m = 0.125 \text{ нс}$$

$$v_S = 3.26 \text{ км/с}, \tau = 7, \rho_a = 29 \text{ мг см}^{-2}$$

$$\delta = 0.09$$

Данные прямого численного моделирования процессов пыления (SPH-метод)

Параметры расчета:

материал - свинец, $Rz = 5$ мкм

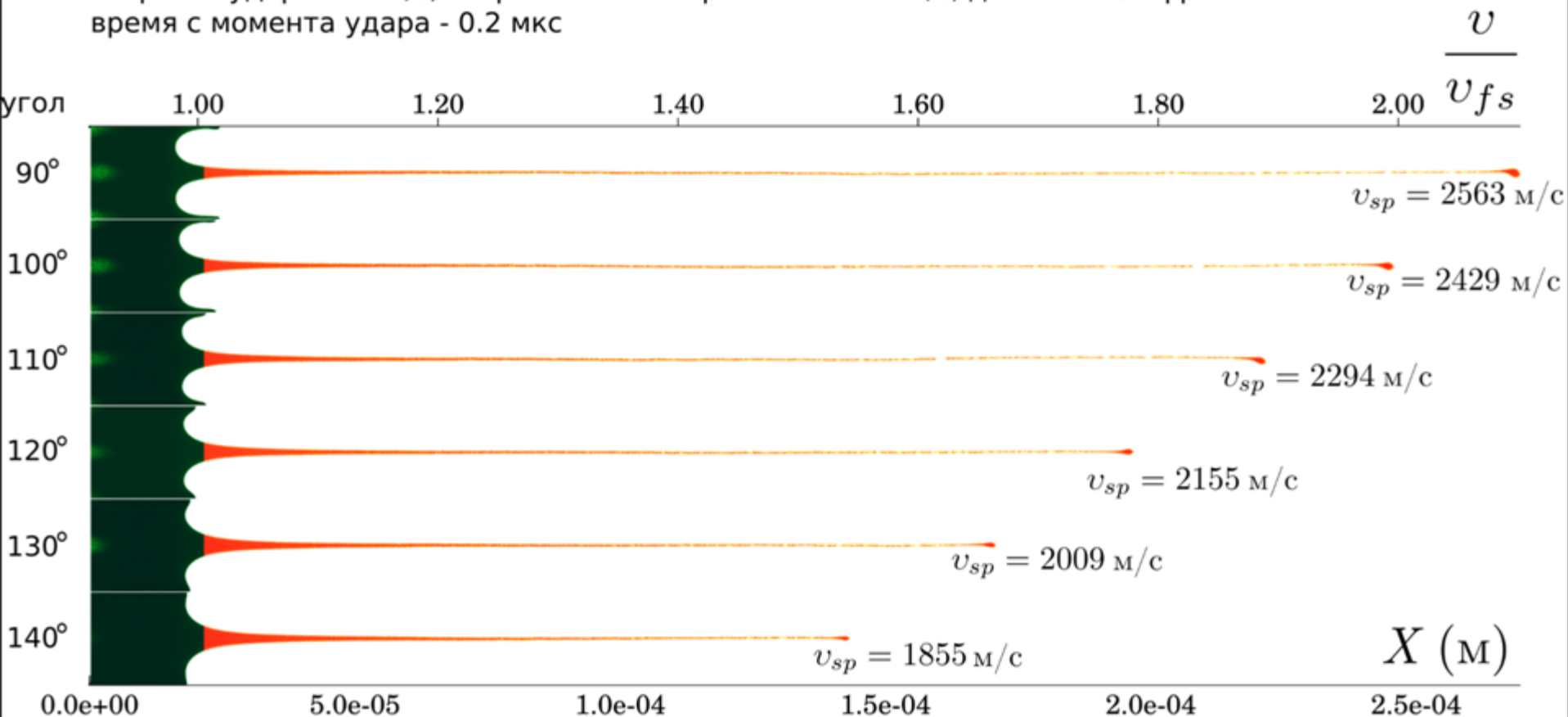
Размеры образца - $Lx = 60$ мкм, $Ly = 17.32$ мкм, $Lz = 1$ мкм

y, z - периодические граничные условия

число SPH частиц ~ 7 млн.

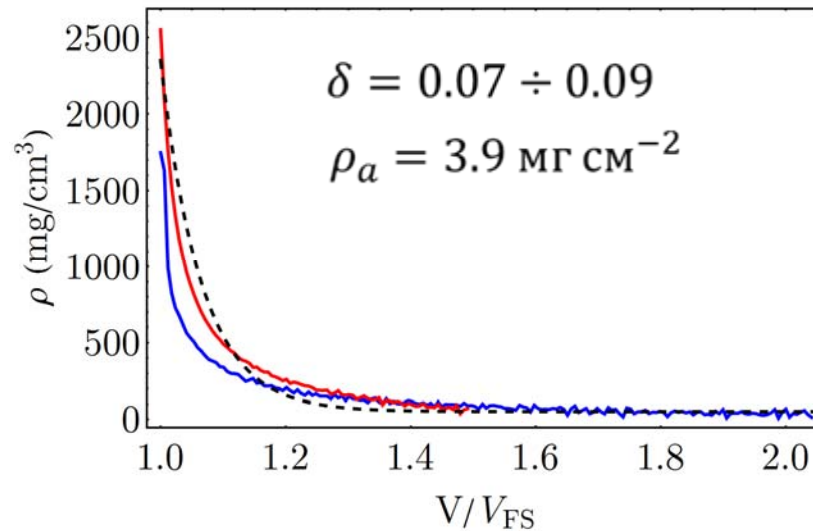
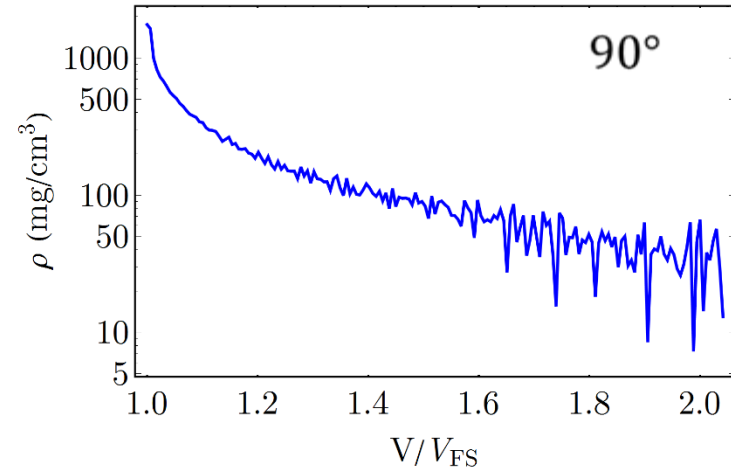
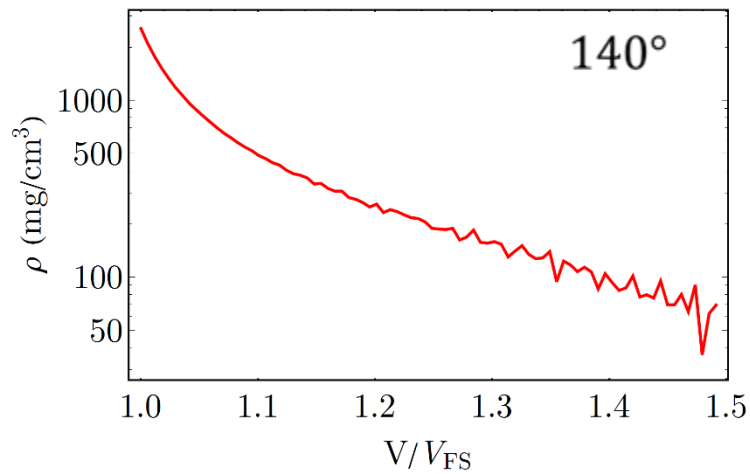
скорость удара 610 м/с, скорость св. поверхности 1220 м/с, давление за фронтом УВ 23 ГПа

время с момента удара - 0.2 мкс



Данные по распределению объёмной плотности по скоростям (SPH-метод)

$$P_{yB} = 23 \text{ ГПа}, R_a = 0.86 \text{ мкм}$$

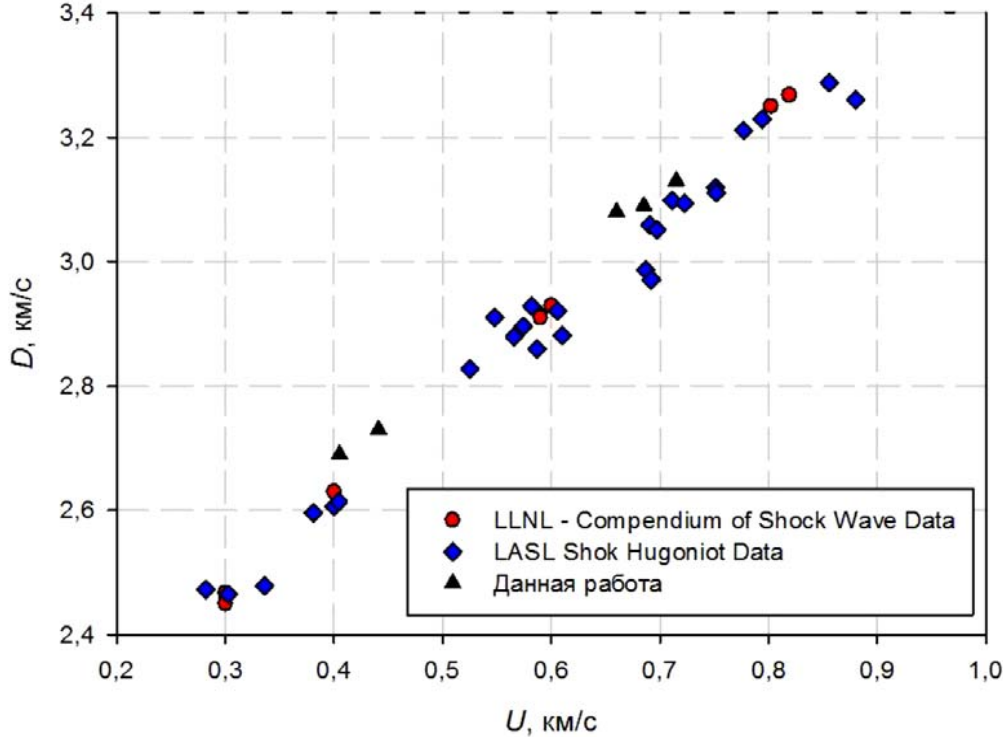


Заключение

- ✓ Продемонстрирована возможность извлечения информации о плотностных характеристиках пыления металлических образцов из данных PDV-измерений из решения транспортного уравнения для обратнорассеянного сигнала
- ✓ Получено согласие данных по плотностным характеристикам процессов пыления, полученным из интерпретации данных PDV-измерений с результатами прямого численного моделирования (SPH-метод)
- ✓ Выполнена оценка откольной прочности свинца

Спасибо за внимание!

Оценки ударной сжимаемости и откольной прочности свинца



Зависимость скорости фронта ударной волны от массовой скорости

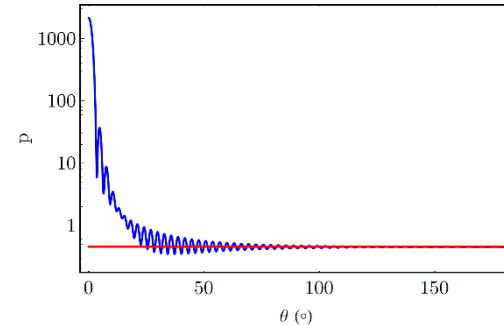
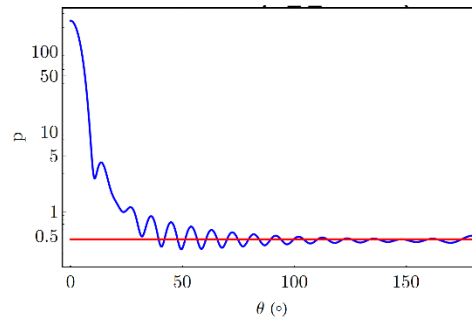
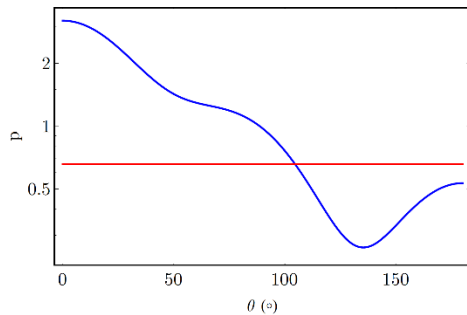
Расчёт откольной прочности в гидродинамическом приближении
 $\sigma_{spall} = 1/2 \times \rho_0 \times c_0 \times \Delta V$ (Е.И. Забабахин, Некоторые вопросы газодинамики взрыва, Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1987)

$$h = 6 \text{ мм}$$

$$\sigma_{spall} = 0.5 \times 11.3 \times 2.0 \times 0.073 = 0.83 \text{ ГПа}$$

Модель s-рассеяния

Индикатрисы рассеяния сферических металлических частиц (теория Ми*) для типичных размеров в эксперименте (1, 10, 30 мкм, длина



Изотропная часть (плато) профиля индикатрисы рассеяния

$$\sigma_{tr} = (1 - \langle \cos \theta \rangle) \sigma_s$$

Транспортное приближение рассеяния

$$\sigma p(\Omega, \Omega') = \frac{\sigma_{tr}}{4\pi} + \sigma_d \delta(\Omega - \Omega')$$

Транспортное уравнение для изотропной индикатрисы рассеяния

$$\left(\mu \frac{\partial}{\partial z} + \sigma + \kappa \right) I(z, \mu, t) = \frac{\sigma}{2} \int_{-1}^1 d\mu' \exp[-ik_0(\mu - \mu')v(z)t] I(z, \mu', t)$$

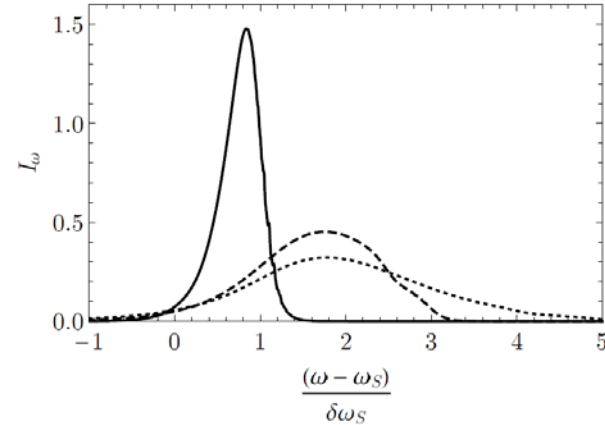
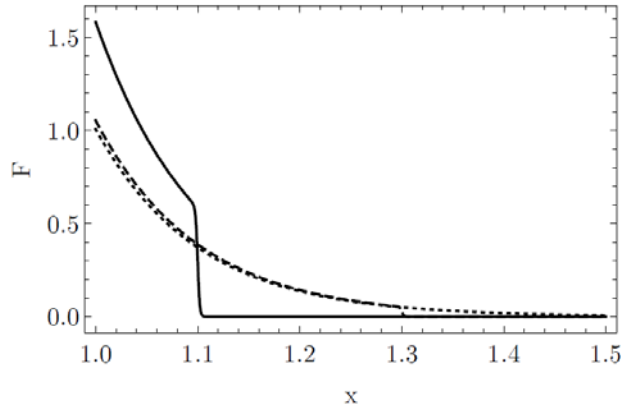
Диффузионное приближение

$$I(\tau, \mu, t) = \frac{1}{4\pi} [\Phi(\tau, t) + 3\mu J(\tau, t)]$$

$$\left[\frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + ik_0 \frac{\partial v}{\partial \tau} t \right) - \frac{1 - \Lambda}{\Lambda^2} \right] \Phi(\tau, t) = \rho_0(\tau, t)$$

Влияние параметров распределения частиц по скоростям на PDV-спектр

Примеры распределения объёмной плотности по скоростям и соответствующие им спектральные профили, полученные с помощью решения транспортного уравнения

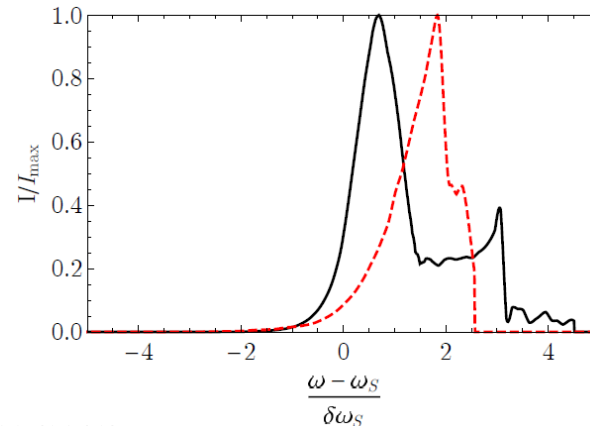
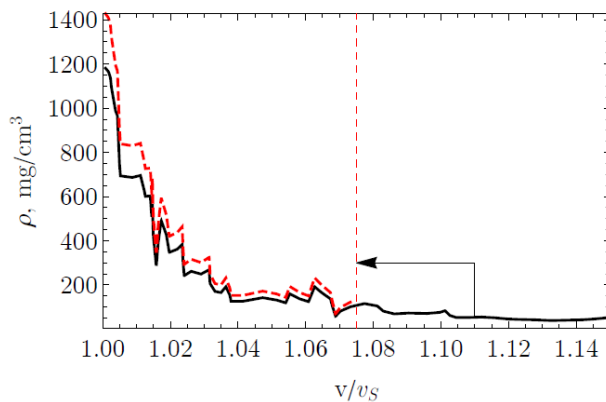


$$F(x) = \frac{1}{\delta} \exp\left(-\frac{x-1}{\delta}\right) \eta(x)$$

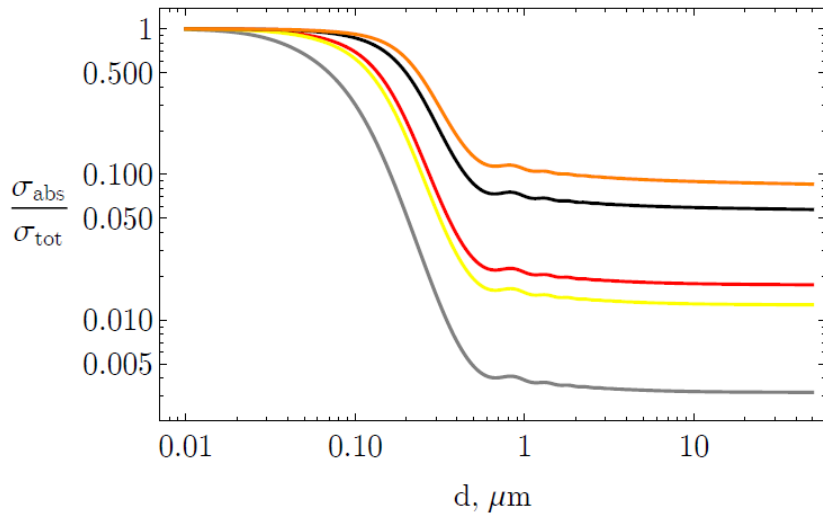
$$\eta(x) = \eta_0 / (1 + \exp[(x - x_0)/\delta_0])$$

Модифицированная экспоненциальная модель распределения объёмной плотности, «имитирующая» торможение частиц

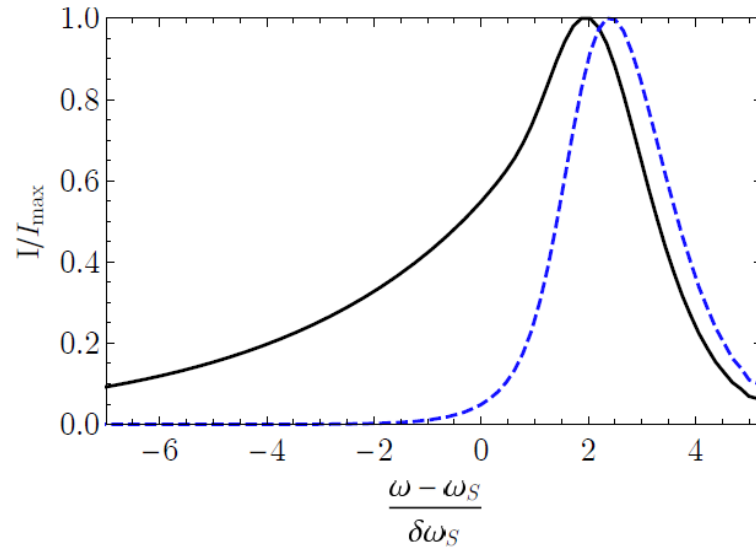
Распределение из прямых экспериментальных измерений*, моделирование торможения и соответствующие спектральные распределения как результаты численных расчётов



Влияние поглощения



Отношение сечения поглощения к полному сечению как функция диаметра частиц Sn, Pb, Cu, Au, Ag (оранжевая, чёрная, красная, жёлтая и серая кривые, соответственно). Расчёт по коду³



Спектр сигнала обратного рассеяния в отсутствие и с наличием поглощения (альбедо 0.9) – сплошная и штриховая кривые, соответственно. Результаты численного интегрирования уравнения

³ www.philiplaven.com