



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

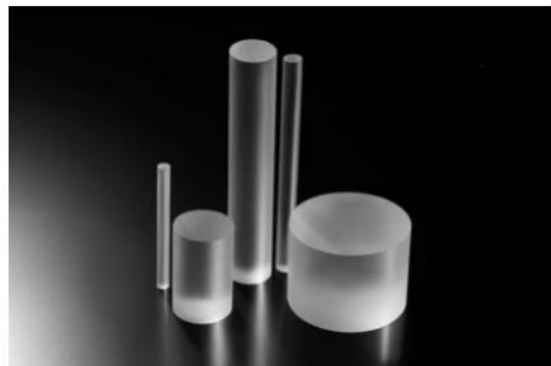
# ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОПРАВочНОГО КОЭФФИЦИЕНТА К ВИДИМОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ ОБРАЗЕЦ- ОКНО ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УДАРНОГО СЖАТИЯ КРИСТАЛЛА LiF

Несмиянов Е.И.<sup>1,2</sup>, Красильников А.В.<sup>1</sup>, Попцов А.Г.<sup>1</sup>,  
Ковалев А.Е.<sup>1</sup>, Жеребцов А.Л.<sup>1</sup>, Шестаковская Е.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Россия, г. Снежинск

<sup>2</sup> ЮУрГУ (НИУ), Россия, г. Челябинск

Оптическая прозрачность при  $\lambda = 120 \div 6000$  нм



Фторид лития LiF



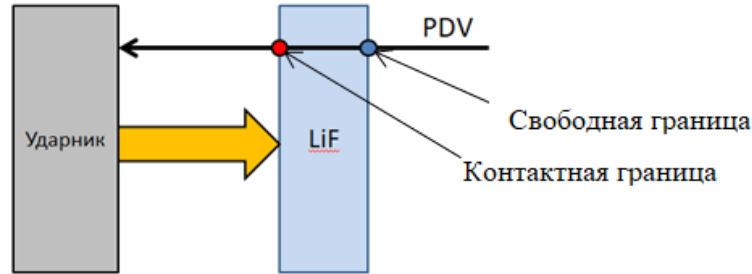
Отсутствие плавления + оптическая прозрачность  
при ударном сжатии до 160 ГПа



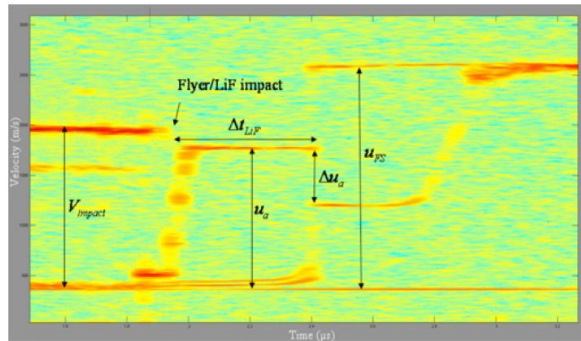
Оптическое окно для  
лазерных методик

Ударная нагрузка  Изменение оптических свойств кристалла

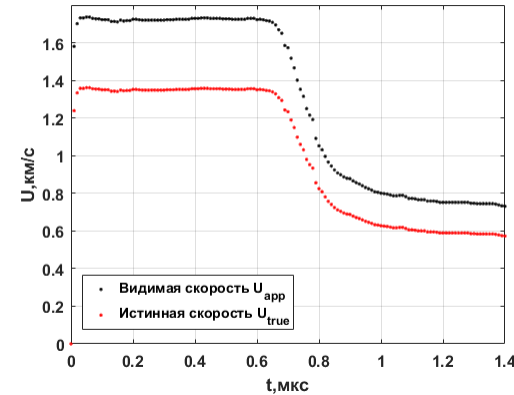
# Интерпретация измерений PDV (ЛГМ)



Постановка эксперимента



Типичные спектрограммы



Восстановленные профили  
массовой скорости

$$u_{app} \neq u_{true}$$

$$a = \frac{u_{app}}{u_{true}}$$

# Поправочный коэффициент. Способ 1

Связь между видимой и истинной скоростью

$$U_{app} = U_{true} n_s - D(n_s - n_0)$$

Зависимость показателя преломления от плотности

$$\begin{aligned} n_s &= n_0 + b(\rho - \rho_0) = \\ &= n_0 - b\rho_0 + b\rho = \\ &= a + b\rho \end{aligned}$$

Закон сохранения массы на ударной волне

$$\rho_0 D = \rho(D - U)$$

В результате

$$U_{app} = aU_{true}$$

Т.к. применяем закон сохранения массы на УВ, то данный способ применим только для ударного сжатия!

# Поправочный коэффициент. Способ 2

Скорость изменения оптического пути исследуемого материала

$$U_{app} = -\frac{dZ}{dt}$$

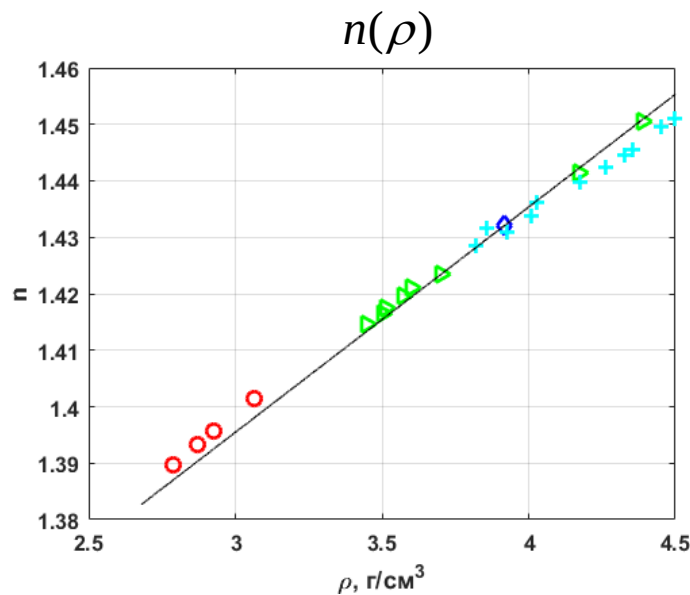
Оптический путь  $Z(t) = \int_L n(x, t) dx$

При известной зависимости  $n(\rho) = a + b\rho$   
 $Z(t) = \int_L (a + b\rho) dx$

Тогда 
$$U_{app} = \frac{d \int_L (a + b\rho) dx}{dt} \quad * \quad U_{app} = a \frac{d \int_L dx}{dx} + b \frac{d \int_L \rho dx}{dx} = aU + b \frac{d \int_L \rho dx}{dx} \quad **$$

- Красильников А.В., Несмиянов Е.И., Попцов А.Г. И др. Исследование поправочного коэффициента кристалла фторида лития в процессе его ударного сжатия и изоэнтропической разгрузки // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика, механика, физика. – 2024
- Гамов А.Л., Тагиров Р.Р., Чудаков Е.А. Гетеродинные измерения скорости (PDV) в средах с быстроизменяющимся коэффициентом преломления. Эльбрус, 2023

# Поправочный коэффициент



○ – Jensen, 2007

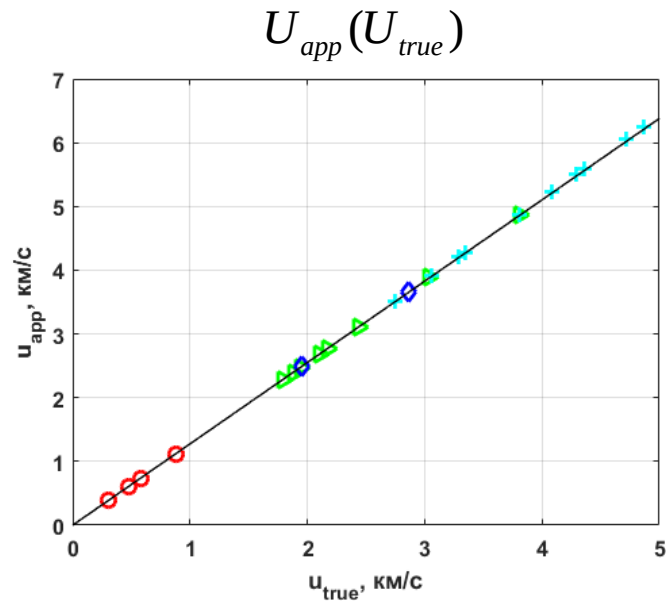
▶ – Rigg, 2014

+ – Zhao, 2014

◈ – Young, 2018

Эксперименты:

Аппроксимация: —

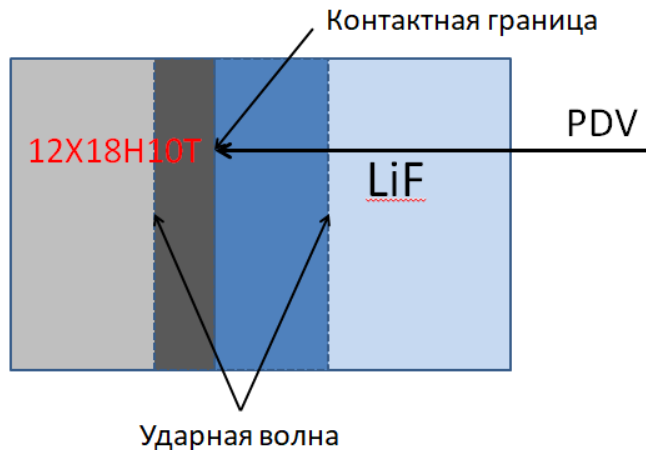


$$\begin{aligned} n &= 1.3287 + 3.99 \cdot 10^{-2} (\rho - 2.68) = \\ &= 1.2758 + 3.99 \cdot 10^{-2} \rho \end{aligned}$$

$$U_{app} = 1.2758 \cdot U_{true}$$

# Постановка экспериментов с ударником

| Опыт №                    | 1               | 2     | 3     | 4   |
|---------------------------|-----------------|-------|-------|-----|
| Материал ударника         | Сталь 12Х18Н10Т |       |       |     |
| Толщина ударника, мм      | 4,5             | 2,5   | 2     | 1,6 |
| Скорость ударника<br>км/с | 0,53            | 1,265 | 1,930 | 5,2 |
| Материал образца          | LiF             |       |       |     |
| Толщина образца, мм       | 20              |       |       |     |



Система уравнений, описывающая одномерные упругопластические течения, в декартовых координатах

$$\dot{\rho} = -\rho \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \rho \dot{v} = \frac{\partial}{\partial x} (S_{xx} - P), \quad \rho \dot{U} = (-P + S_{xx}) \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \dot{S}_{xx} = \frac{4\mu}{3} \frac{\partial v}{\partial x}.$$

где  $\rho$  – плотность,  $v$  – скорость,  $P$  – давление,  $\mu$  – модуль сдвига,  $E$  – внутренняя энергия единицы массы,  $S_{xx}$  –  $x$ -компонента тензора девиатора напряжений

Упруго-пластическая модель Мизеса

$$\dot{S}_{xx} \leq 2Y_0^2 / 3$$

$Y_0$  – предел текучести

Уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена

$$P = P_x + \frac{\Gamma(V)}{V} (E - E_x)$$



# Уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена



$$P(V, E) = P_x(V) + \frac{\Gamma(V)}{V} (E - E_x(V))$$

**Холодная часть давления**

скорость звука

$$P_x = \frac{B_0 c_0^2}{V_0} \left[ \left( \frac{V_0}{V} \right)^n - 1 \right]$$

подбираемые параметры

**Коэффициент Грюнайзена**

$$\Gamma = \Gamma_0 \left( \frac{V}{V_0} \right) \left[ 1 + \Gamma_0 \left( 1 - \frac{V}{V_0} \right) \right]^{-1}$$

параметр Грюнайзена

**Холодная часть энергии**

$$E_x = B_0 c_0^2 \left\{ \frac{1}{n-1} \left[ \left( \frac{V_0}{V} \right)^{n-1} - 1 \right] - 1 + \frac{V}{V_0} \right\}$$

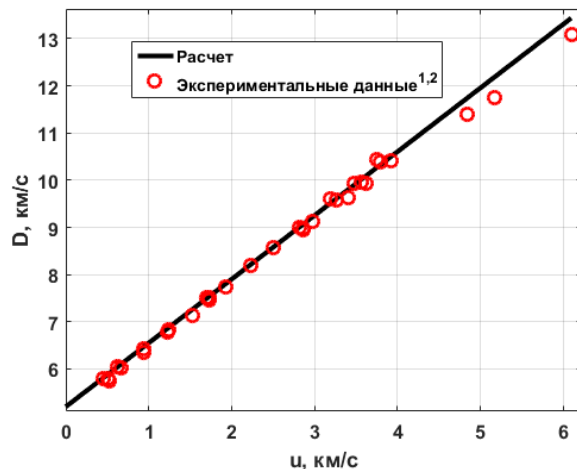
удельный объем

начальный удельный объем

# Уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена

Теоретическая ударная адиабата

$$P_m = \frac{P_X - \frac{\Gamma}{V} E_X}{1 - 0,5\Gamma \left( \frac{V_0}{V} - 1 \right)}$$

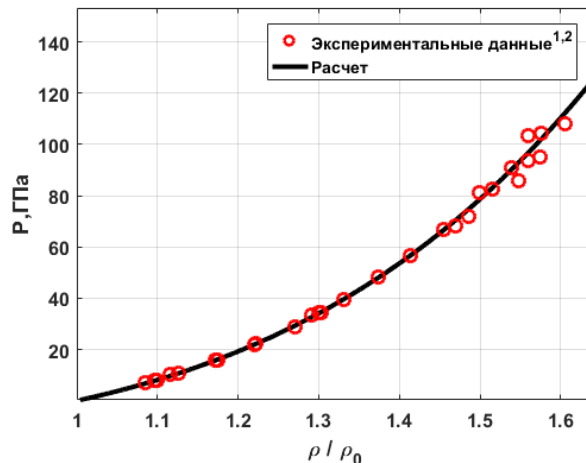


Экспериментальная ударная адиабата

$$P_{\text{экс}} = \frac{c_0^2 (V_0 - V)}{(V_0 - \lambda(V_0 - V))^2}$$

$$D = c_0 + \lambda u$$

$$\Gamma_0 = 2(\lambda - 1)$$



$$c_0 = 5.201$$

$$\lambda = 1.35$$

$$B_0 = 0.222$$

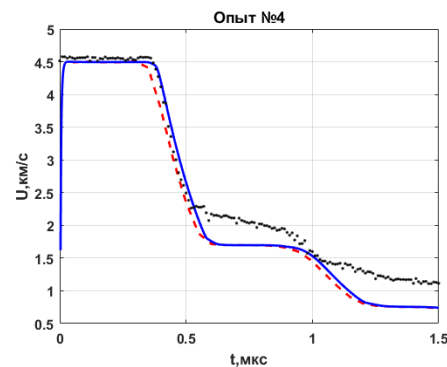
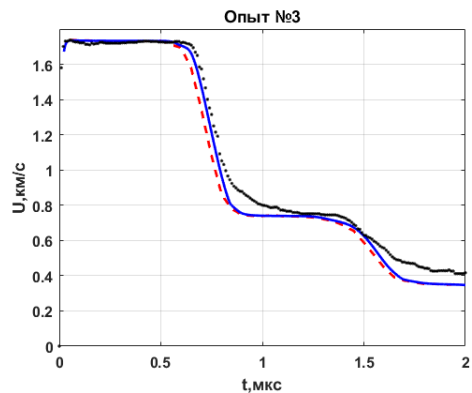
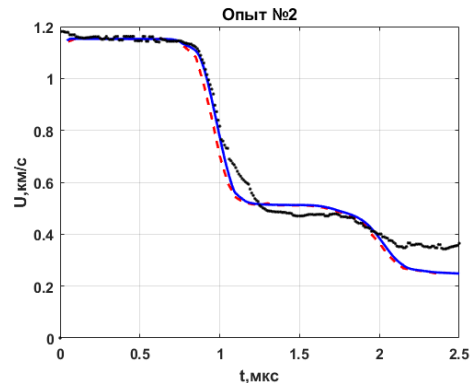
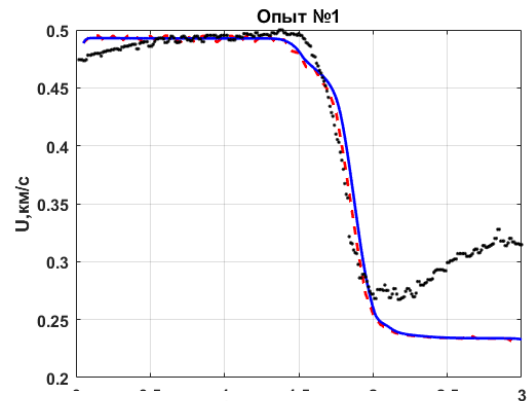
$$\Gamma_0 = 4.332$$

$$n = 0.7$$

# Сравнение экспериментальных и расчетных данных



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



— — Расчет через оптический путь

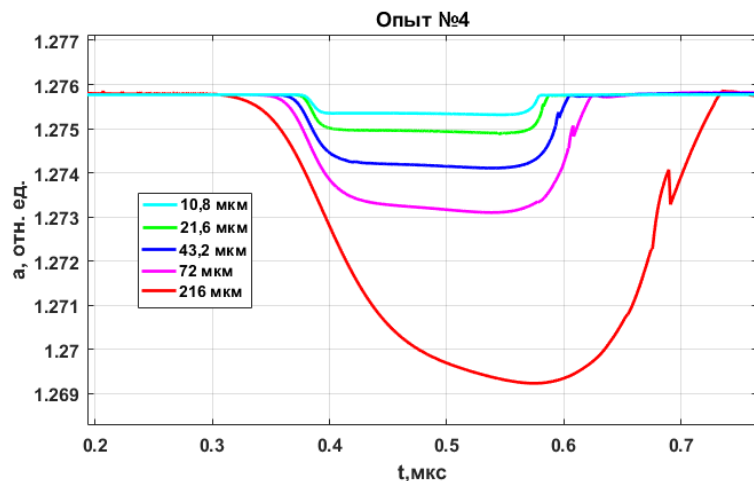
— Расчет через постоянный поправочный коэффициент

\* Эксперимент

# Сеточная зависимость

$$a = \frac{U_{app}}{U_{true}}$$

Для сетки 43,2 мкм

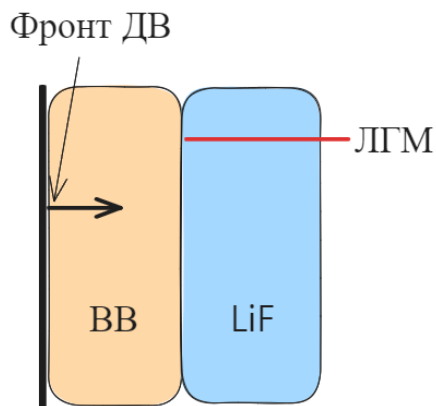


Поправочный коэффициент, опыт №4

| Опыт № | $\delta a/a, \%$ |
|--------|------------------|
| 1      | 0,17             |
| 2      | 0,32             |
| 3      | 0,14             |
| 4      | 0,13             |

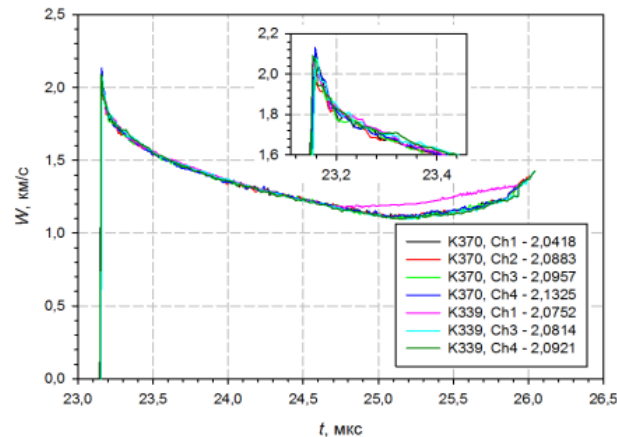
# Применение LiF в опытах с ВВ. Плоская волна

Постановка  
эксперимента с  
плоской волной



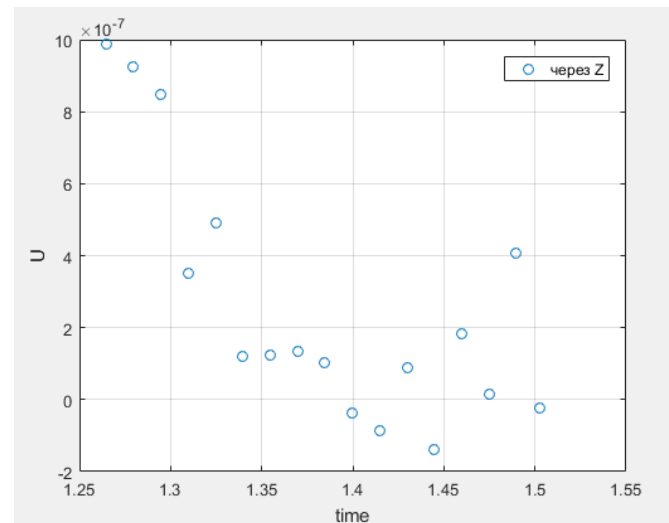
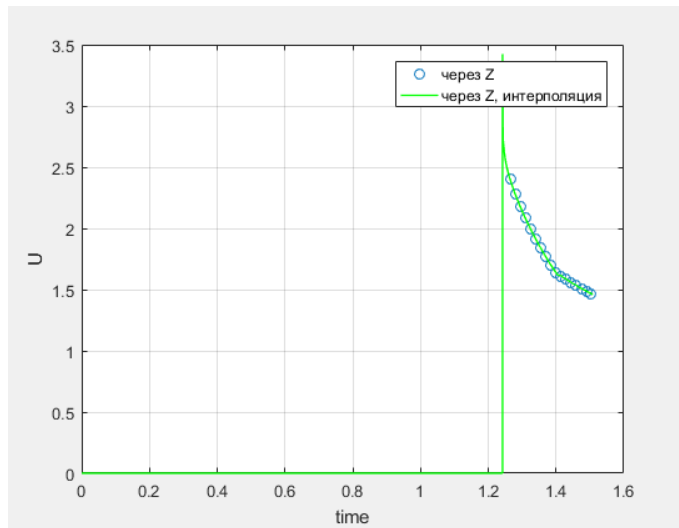
Инициирование

Граница ПВ-окно



После ударного сжатия  
моментально начинается разгрузка

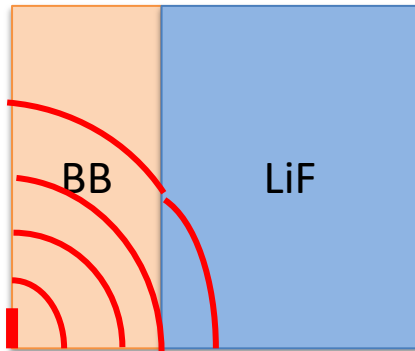
# Применение LiF в опытах с ВВ. Плоская волна



# Применение LiF в опытах с ВВ.

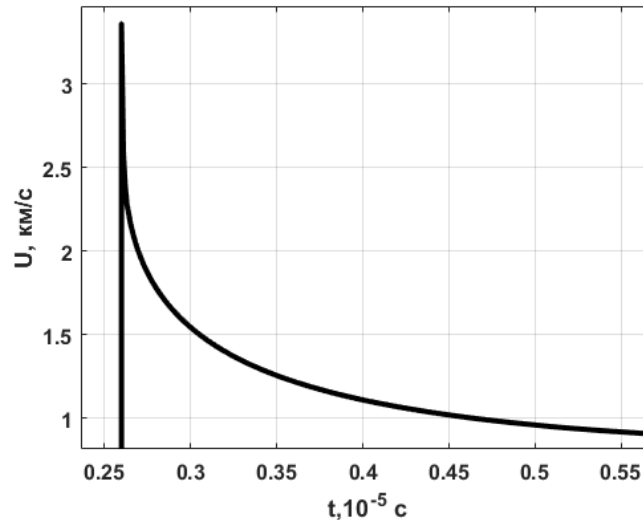
## Расходящаяся волна

Постановка  
эксперимента с  
расходящейся волной



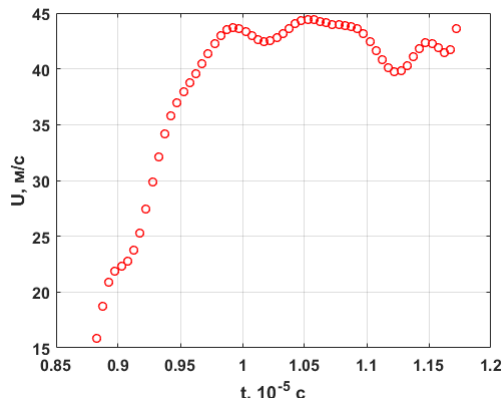
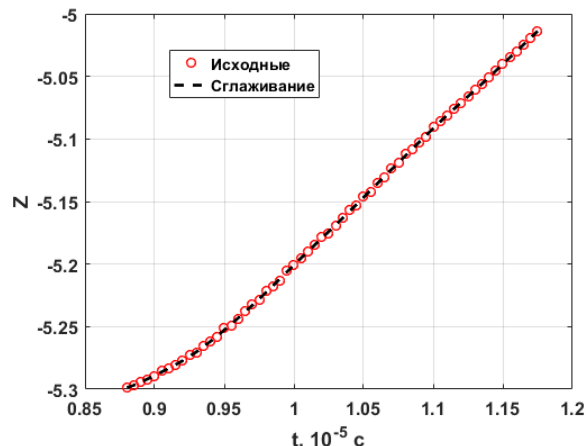
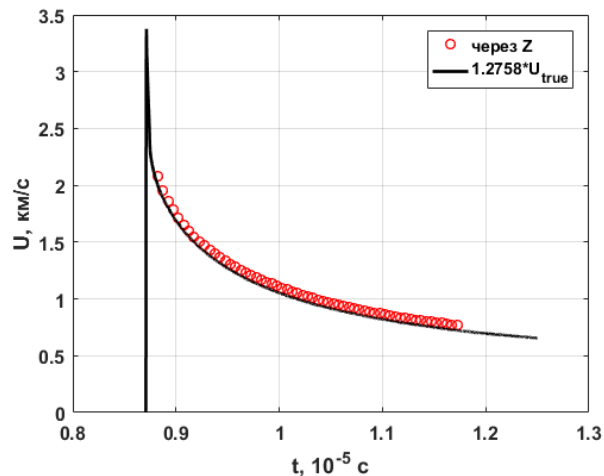
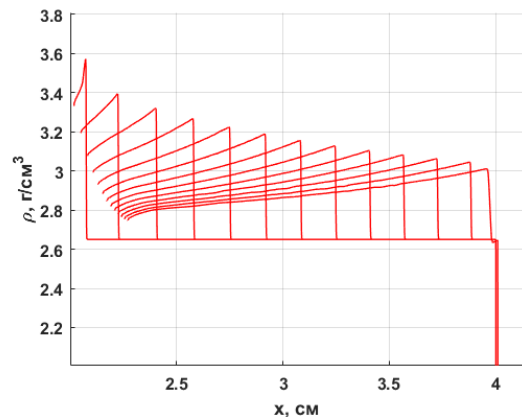
Инициирование

Граница ПВ-окно



# Применение LiF в опытах с ВВ.

## Расходящаяся волна

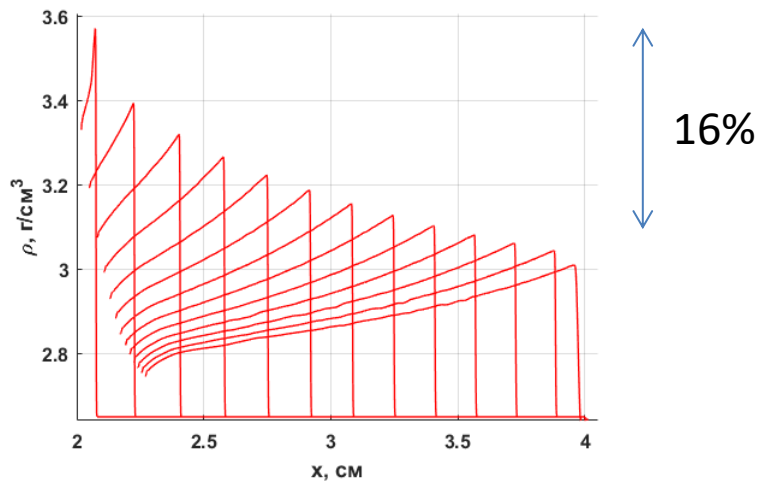


Максимальное отклонение 45 м/с  
5%

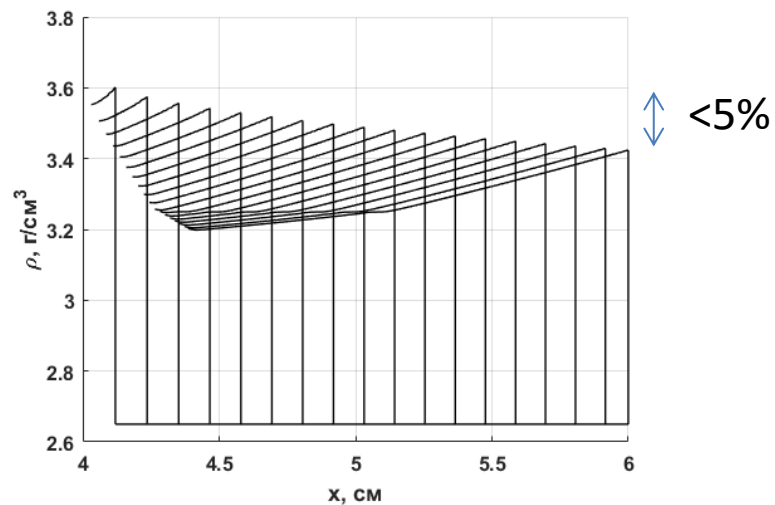


# Опыты с детонационными волнами

## Расходящаяся УВ



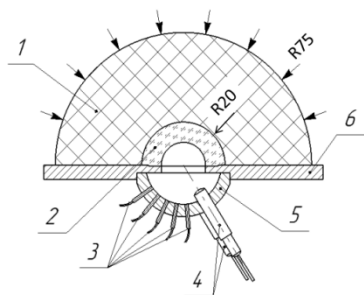
## Плоская УВ



| Тип ДВ             | Макс. отклонение, м/с | Макс. относ. отклонение, % |
|--------------------|-----------------------|----------------------------|
| расходящаяся волна | 45                    | 5                          |
| плоская волна      | 0,01                  | $\sim 10^{-5}$             |

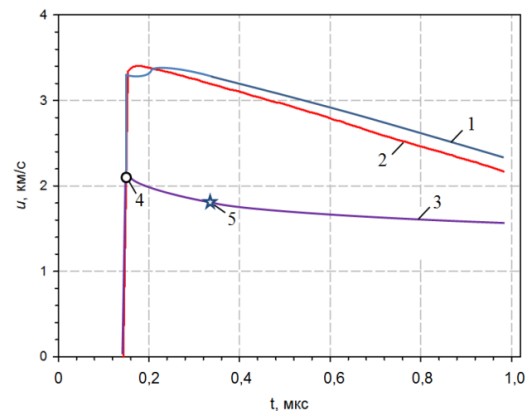
Возможно, что повлияла малость изменения градиента плотности

# Применение LiF в опытах с детонационными волнами



- 1 – заряд ПСТ; 2 – окно из LiF;  
3 – коллиматоры ЛГМ;  
4 – оптические головки;  
5 – держатель оптических головок и коллиматоров;  
6 – опорная плита.  
Стрелки – направления действия системы иницирования.

\* Таржанов В.И., Петров Д.В., Гармашев А.Ю., Кучко Д.П., Воробьев А.В., Ральников М.А., Боярников Д.С., Аминов Ю.А., Никитенко Ю.Р. **Пересечение сферически сходящейся детонации в пластифицированном ТАТБ** // Физика горения и взрыва, 2021, в печати.



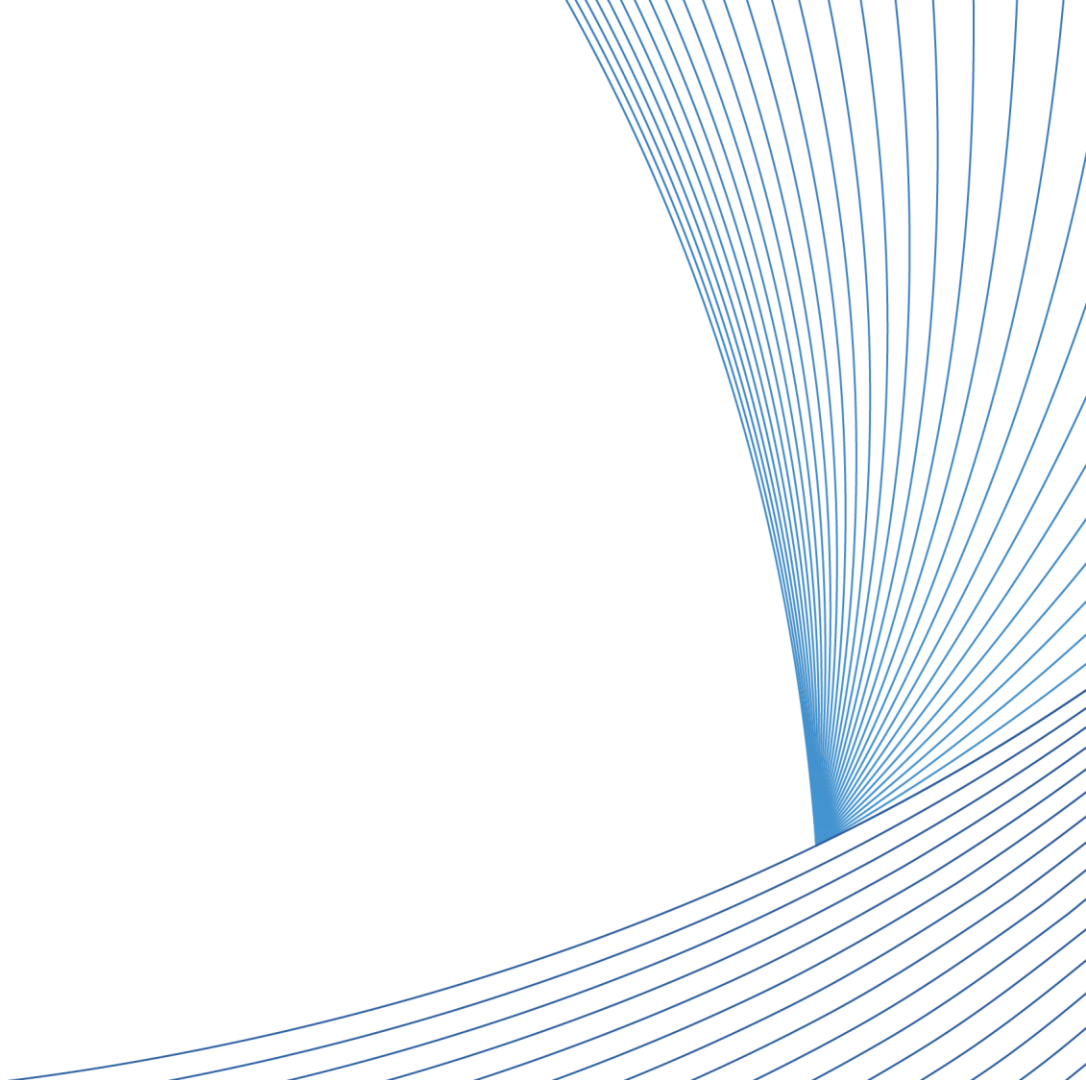
1 – расчет, 2 – эксперимент, 3 – профиль нормальной детонации в ПСТ,  
4 и 5 – состояния Неймана и Жуге соответственно

- Проведены взрывные эксперименты с использованием окна из фторида лития, а также их моделирование
- Исследованы 2 метода расчета видимой массовой скорости: через закон сохранения массы на ударной волне и с помощью изменения оптического пути. Показаны преимущества второго метода
- При ударном сжатии в плоском случае поправочный коэффициент  $a = 1.275$  можно считать постоянным в силу малости изменения градиента плотности.
- В опытах с расходящимися детонационными волнами поправочный коэффициент может заметно изменяться за счет влияния изоэнтропической разгрузки. В экспериментах с лазерными источниками нагружения такое изменение может быть еще заметнее.

# Спасибо за внимание

**Несмиянов Елисей Игоревич**

E-mail: [e.i.nesmiyanov@vniitf.ru](mailto:e.i.nesmiyanov@vniitf.ru)



## 1960-е года, группа Кормера, Зельдовича, Кириллова

- Кормер, С. Б., Юшко, К. Б., Кришевич, Г. В. (1966). Зависимость показателя преломления от плотности твердой и жидкой фаз ударно сжатых ионных кристаллов. *Письма в ЖЭТФ*, 3(2), 64–69.
- Зельдович, Я. Б., Кормер, С. Б., Синицын, М. В., Юшко, К. Б. (1961). Исследование оптических свойств прозрачных веществ при сверхвысоких давлениях. *Доклады Академии наук СССР*, 138(6), 1333–1336.

## 1980-е года, развитие лазерных интерферометров

- Wise, L.C. Laser Interferometer Measurements of Refractive Index in Shock-Compressed Materials // *Shock Waves in Condensed Matter*, Plenum. – 1986. – P. 441.

## 2000-2010-е года, появление лазерного гетеродин-интерферометра

- Young G. Refractive Index of [100] Lithium Fluoride under Shock Pressures up to 151 GPa // *AIP Advances*. – 2018.
- Smirnov N.A. Ab initio Calculations of the Thermodynamic Properties of LiF Crystal. *Physical Review*, 2011
- Kirsch, L.E. Refractive Index of Lithium Fluoride to 900 Gigapascal and Implications for Dynamic Equation of State Measurements / L.E. Kirsch, S.J. Ali, D.E. Fratanduono et al. // *J. Appl. Phys.* – 2019. – Vol. 125. – P. 175901.

## Наши дни, уточнение поправок

- Гамов А.Л., Тагиров Р.Р., Чудаков Е.А. Гетеродинные измерения скорости (PDV) в средах с быстроизменяющимся коэффициентом преломления. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Эльбрус, 2023
- Красильников А.В., Несмиянов Е.И., Попцов А.Г. И др. Исследование поправочного коэффициента кристалла фторида лития в процессе его ударного сжатия и изоэнтропической разгрузки // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика, механика, физика.* – 2024. – Т. 16, № 4. – С.96–106.

# Влияние УП

Ударник

$$\mu = 77 \text{ ГПа}$$

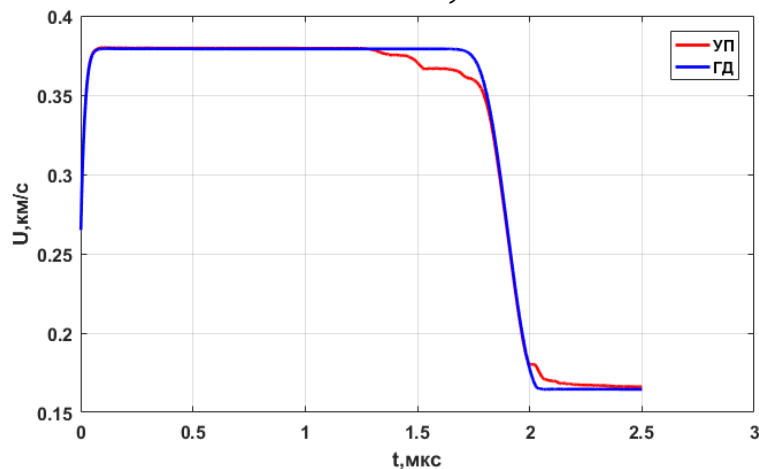
$$Y_0 = 0,2 \text{ ГПа}$$

Образец

$$\mu = 243,6 \text{ ГПа}$$

$$Y_0 = 0,11 \text{ ГПа}$$

Опыт №1  $W = 0,53 \text{ км/с}$



Опыт №2  $W = 5,2 \text{ км/с}$

