



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

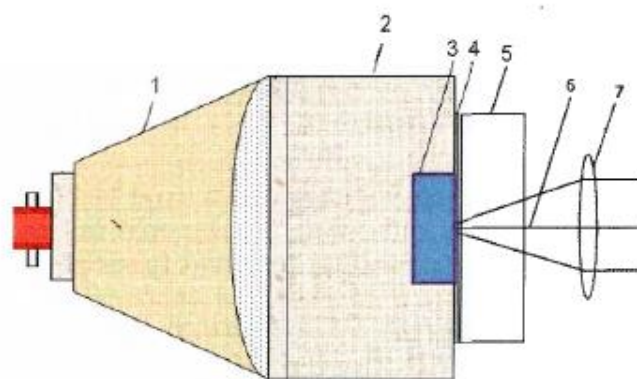
Показатели преломления и поправочные коэффициенты некоторых оптически прозрачных сред при их ударно- волновом нагружении

Попцов Александр Германович

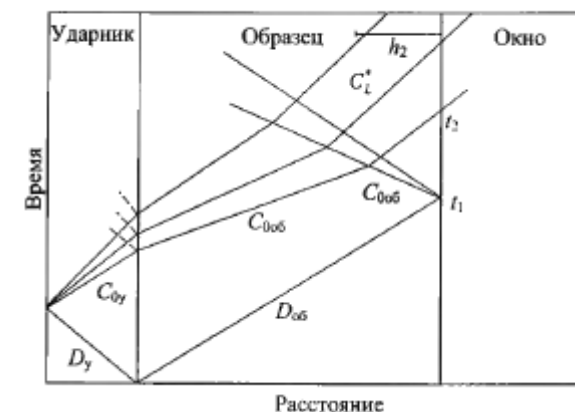
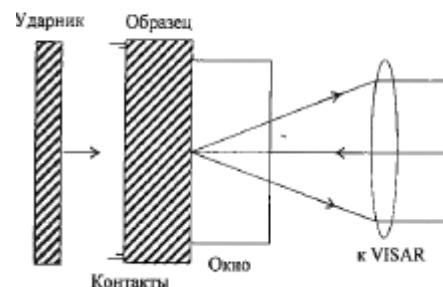
Д.Г. Панкратов, В.А. Карионов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»,
Снежинск, Россия

Для исследования поведения материалов при динамических нагрузках применяются различные оптические методы. Широкое распространение получили метод лазерной интерферометрии [1] и, в частности, лазерно-гетеродинная методика (ЛГМ), в которых используется оптическое окно [2]. Распространение по веществу ударной волны сопровождается увеличением его плотности и температуры, изменением ряда других свойств, в том числе оптических. Следовательно, понимание изменения показателя преломления материалов прозрачных окон при ударной нагрузке имеет решающее значение для правильной интерпретации таких экспериментальных данных [3].



1. Плосковолновой генератор;
2. Заряд ВВ;
3. Монокристалл ВВ;
4. Алюминиевое покрытие;
5. Окно (LiF);
6. Зондируемое лазерное излучение);
7. Фокусирующая линза.



1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках: Монография / Под общ. ред. М. В. Жерноклетова. – 2-е изд., доп. и испр. – Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2005. – С. 428.
2. Экспериментальные методы и средства в физике экстремальных состояний вещества: монография / Под ред. Р.И. Ильяева, А.Л. Михайлова, М.В. Жерноклетова. – М.: РАН, 2021. – С. 484.
3. Wise L.C. Laser interferometer measurements of refractive index in shock-compressed materials / L.J. Wise, L.C. Chhabildas // Shock Waves in Condensed 2 Matter, Plenum. – 1986. – P. 441.

Альберт Абрахам Майкельсон

Albert Abraham Michelson



Шарль Фабри

фр. *Marie Paul Auguste Charles Fabry*



Жан-Батист Альфред Перо

фр. *Jean-Baptiste Alfred Perot*



Александр Михайлович Прохоров



Николай Геннадиевич Басов



Исторический экскурс

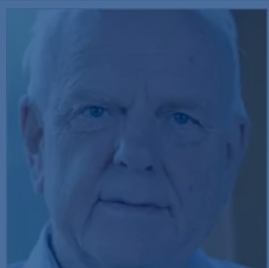
Теодор Майман

англ. *Theodore Harold Maiman*



Уильям Ралф Беннетт

англ. *William Ralph Bennett Jr.*



Али Джаван

азерб. *Əli Cavan*, англ. *Ali Javan*



Жорес Иванович Алфёров



Валентин Гапонцев

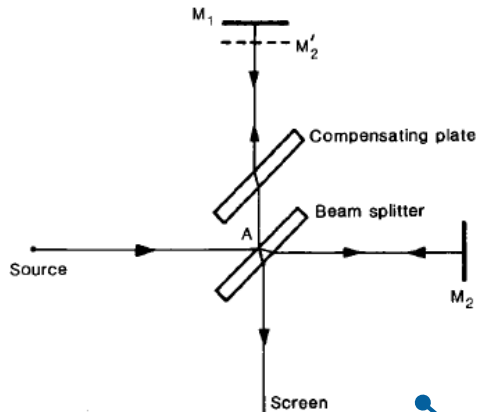


Лазерные интерферометрические системы

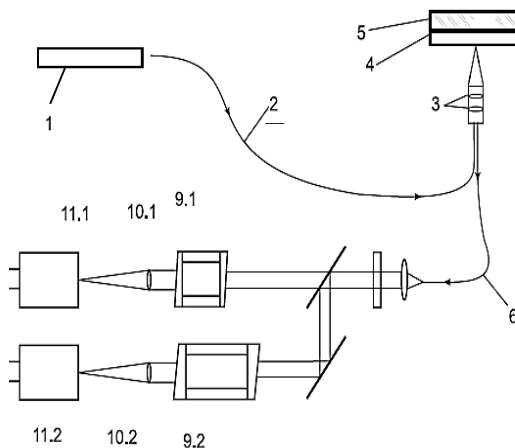


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

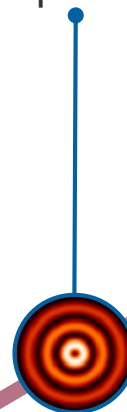
Гетеродинный
метод на
интерферометре
Майкельсона



Системы на
интерферометрах
Фабри-Перо

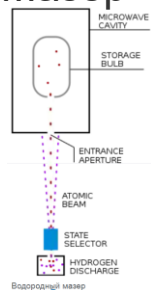


Развитие ЛИМ
Фабри-Перо и
ORVIS в
газодинамических
экспериментах



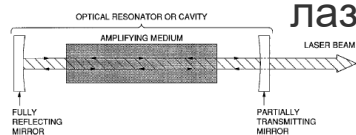
1975-1990

Квантовый
генератор
Мазер



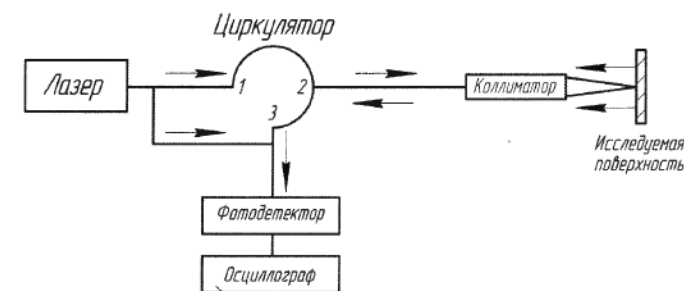
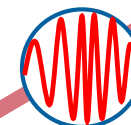
1965-1975

Первые
твердотельные
лазеры



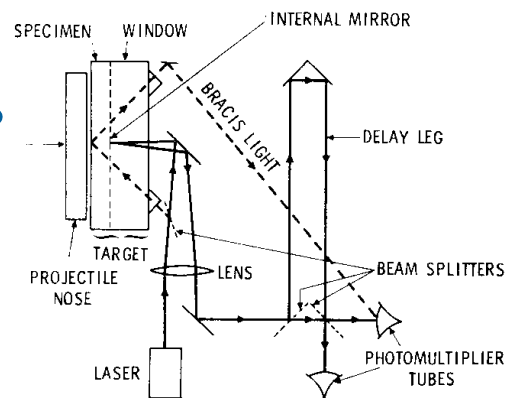
1954-1965

1997-2003



Лазерно-гетеродинные
системы
(PDV, HET-V)

VISAR и ORVIS



ЖУРНАЛ «ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА» ТОМ 41, НОМЕР 10 СЕНТЯБРЬ 1970 ГОДА

Ударно-волновые исследования ПММА, плавленого кварца и сапфира*

Д. М. Баркер (D. M. Barker) и Р. Е. Холленбах (R. E. Hollenbach)

Сандийские лаборатории, город Альбукерке, штат Нью-Мексико 87115

(получено 3 апреля 1970 года)

Характеристики полиметилметакрилата (ПММА), плавленого кварца и сапфира в условиях распространения ударной волны были измерены в ходе ударных экспериментов с пластиной, используя интерферометрические методы, как для волн разрежения, так и для волн сжатия. При проведении экспериментов уровни максимального напряжения составили 22, 65 и 120 кбар, соответственно. Измерения с высоким разрешением профилей волн напряжений показали, что ПММА является сложным материалом, при использовании которого на распространение волны влияют нелинейность, зависимость от скорости деформации и упруго-пластические эффекты, когда пластическое деформирование увеличивает объём материала при нулевом давлении. Плавленый кварц хорошо характеризуется как нелинейный упругий материал, который обладает очень интересным свойством — проводить устойчивые ударные волны разрежения. Сапфир был почти линейно упругим до уровня 120 кбар. В работе обсуждается использование этих трёх прозрачных материалов в качестве «окон» при проведении ударно-волновых исследований других материалов с помощью лазерных интерферометрических систем. Также в работе описано, как изменение показателя преломления под действием ударной нагрузки влияет на интерферометрические данные, и дана оценка этого влияния.

Interferometric measurement of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity*

J. R. Asay and L. M. Barker

Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87115

(Received 16 November 1973)

Methods of applying laser interferometry to measure particle velocity history at the interface between a shocked specimen and a transparent window material are discussed. Particular emphasis is given to diffusely reflecting interface surfaces, to shock-induced light polarization shifts which can occur in the window material, and to a transient loss of fringe contrast which occurs whenever the reflecting surface velocity is spatially nonuniform. It is shown that the loss of fringe contrast can be used to provide time-resolved measurements of the spatial variations in particle velocity.



Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry

B. J. Jensen,^{a)} D. B. Holtkamp, and P. A. Rigg
Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545

D. H. Dolan
Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185-1181

(Received 16 August 2006; accepted 27 October 2006; published online 12 January 2007)

Symmetric, plate-impact experiments using photon Doppler velocimetry (PDV) with established shock wave diagnostics have demonstrated that the velocity accuracy of PDV is limited by the refractive indices of the media. Refractive indices were also measured with any reflector (VISAR) (at 532 nm) to oblique incidence, and z-cut quartz. Time-dependent measurements provide a direct comparison between PDV and VISAR. The shortcomings of the new diagnostic. From the American Institute of Physics. [DOI: 10.

EPJ Web of Conferences **26**, 01022 (2012)
DOI: 10.1051/epjconf/20122601022
© Owned by the authors, published by EDP Sciences, 2012

Interferometric windows characterization up to 450 K for shock wave experiments: Hugoniot curves and refractive index

E. Fraizier, P. Antoine, J.-L. Godefroit, G. Lanier, and G. Roy
CEA, DAM, Valduc, 21120 Is-sur-Tille, France

Abstract. Conventional shock wave experiments need interferometric windows in order to determine the equation of state of a large variety of metals. Lithium fluoride (LiF) and sapphire are extensively used for that purpose because their optical transparencies enable the optical diagnostics at interfaces under a given range of shock pressure. In order to simulate and analyse the experiments it is necessary to have accurate interferometric windows. Therefore, our window characterization is conducted. Our preliminary work on the new characterization at 450 K shows the effect of density on optical properties. The determination is a key point and is conducted on LiF windows (1550 nm) diagnostics. Furthermore



A novel approach to Hugoniot measurements utilizing transparent crystals

D. E. Fratanduono, J. H. Eggert, M. C. Akin, R. Chau, and N. C. Holmes
Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550, USA

(Received 15 April 2013; accepted 26 June 2013; published online 26 July 2013)

A new absolute equation of state measurement technique is described and demonstrated measuring the shock state and the refractive index of MgO up to 226 GPa. This technique utilizes steady shock waves and the high-pressure transparency of MgO under dynamic shock compression and release. Hugoniot measurements performed using this technique are consistent with the previous measurements. A linear dependence of the shocked refractive index and density is observed up to 226 GPa, over a magnitude greater in pressure than previous studies. The transparency of MgO along the principal Hugoniot is higher than any other material reported to date. We observe a significant change in the refractive index of MgO as the Hugoniot elastic limit is exceeded due to the transition from uniaxial to hydrostatic strain. Measurements of the elastic-plastic two-wave structure in MgO indicate a nucleation time for plastic deformation. © 2013 AIP Publishing LLC. [<http://dx.doi.org/10.1063/1.4813871>]



СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Д. В. Назаров, А. Л. Михайлов, А. В. Федоров, С. Ф. Маначкин,
В. Д. Урлин, А. В. Меньших, С. А. Финюшин, В. А. Давыдов,
Е. В. Филинов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт физики взрыва, 607190 Саров, root@gdd.vniif.ru

Экспериментально исследовано изменение показателя преломления в полиметилметакрилате и фтористом литии при квазиизоэнтропическом нагружении. Определены значения показателя преломления и поправочного коэффициента в формуле для расчета массовой скорости. Результаты, полученные при квазиизоэнтропическом нагружении, совпадают с данными для ударно-волнового сжатия исследуемых материалов.

Ключевые слова: показатель преломления, квазиизоэнтропическое нагружение, лазерный доплеровский интерферометр Фабри — Перо, монолитный метакрилат.

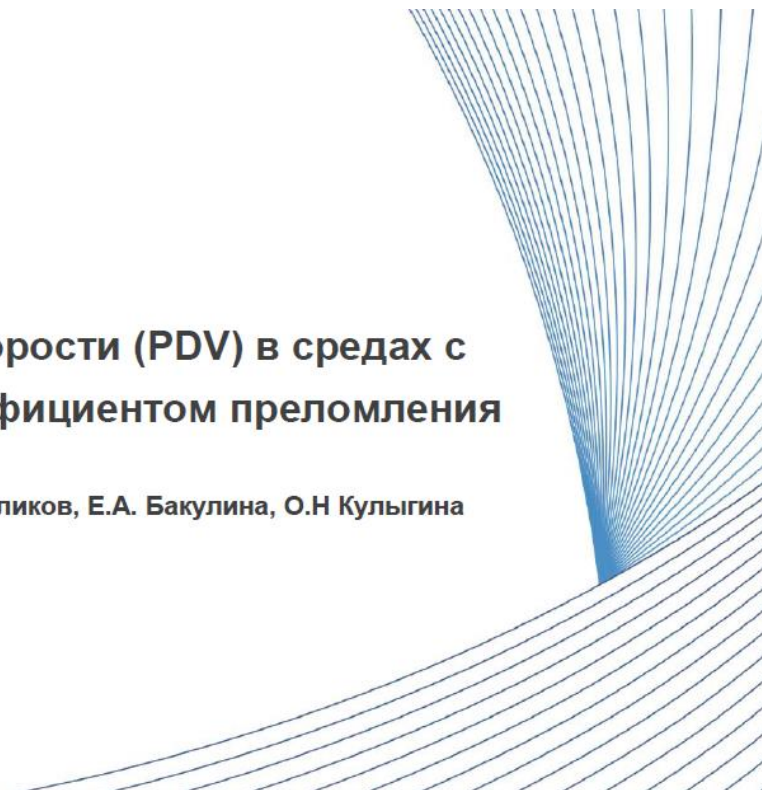


РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Гетеродинные измерения скорости (PDV) в средах с быстроизменяющимся коэффициентом преломления

А.Л. Гамов, Р.Р. Тагиров, Е.А. Чудаков, А. О. Бликов, Е.А. Бакулина, О.Н. Кулыгина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»



СОВМЕЩЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННОЙ МЕТОДИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТЫХ МЕТАЛЛАХ

© 2017 г. Е. А. Козлов*, Д. Г. Панкратов, Д. П. Кучко, А. К. Якунин,
А. Г. Попцов, М. А. Ральников

РФЯЦ-ВНИИ технической физики им. академика Е.И. Забабахина
Россия, 456770, Снежинск Челябинской обл., ул. Васильева, 13

*e-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

Поступила в редакцию 02.02.2016 г.

Для преодоления имеющихся в литературе противоречий в измерениях скоростей звука в ударно-сжатых металлах с использованием разных методик предложено совмещение в каждом взрывном эксперименте фотоэлектрической (ф.э.м.) и лазерно-гетеродинной (л.г.м.) методик. Эффективность совмещения продемонстрирована во взрывных экспериментах со ступенчатыми образцами из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T и высокочистого магния Mg95 при их ударно-волновом нагружении в диапазонах 60–120 и 20–30 ГПа соответственно. При помощи ф.э.м. осуществляется классическая регистрация продольных и объемных скоростей звука. В зависимости от интенсивности нагружения л.г.м. зарегистрировано изменение во времени скорости границы раздела образец–индикатор или изменение во времени скорости фронта ударной волны в индикаторе. По этим данным контролировались параметры ударного сжатия изучаемого образца и определялся момент догона фронта ударной волны в индикаторе первой характеристикой верха волны разрежения. В области относительно низких нагрузок, пока индикаторная жидкость работает как оконный материал, сохраняя прозрачность, л.г.м. регистрирует изменение во времени скорости движения границы раздела изучаемого образца и вещества-индикатора. В области высокоинтенсивных нагрузок обеспечивается устойчивая работа ф.э.м. При этом лазерно-гетеродинной методикой непрерывно во времени регистрируется скорость движения фронта стационарной ударной волны в индикаторе до догона ее волной разрежения. В промежуточной области нагрузок работают обе методики. Совмещение методик позволило повысить надежность получаемой непротиворечивой информации по скоростям звука в ударно-сжатых конструкционных материалах и сократить количество взрывных экспериментов с образцами из токсичных материалов.

DOI: 10.7868/S0032816217010232

Механика

УДК 004.942: 519.633: 534.222.2

DOI: 10.14529/mmph240411

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПРАВочНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КРИСТАЛЛА ФТОРИДА ЛИТИЯ В ПРОЦЕССЕ ЕГО УДАРНОГО СЖАТИЯ И ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ

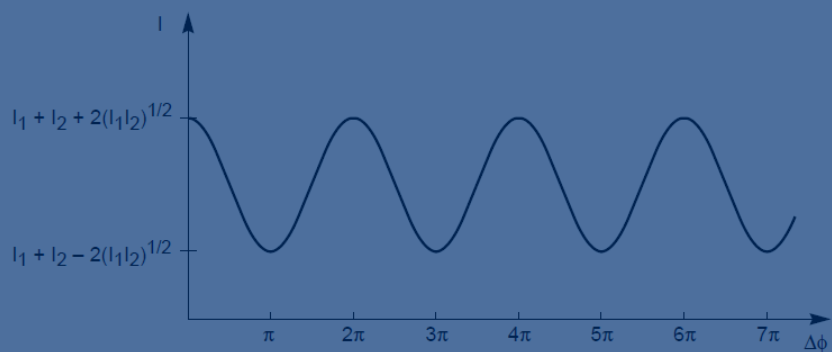
А.В. Красильников¹, Е.И. Несмиянов^{1,2}, Е.С. Шестаковская², А.Г. Попцов¹,
А.Е. Ковалев¹, А.П. Яловец²

¹ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Российская Федерация

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация
E-mail: shestakovskaiaes@susu.ru

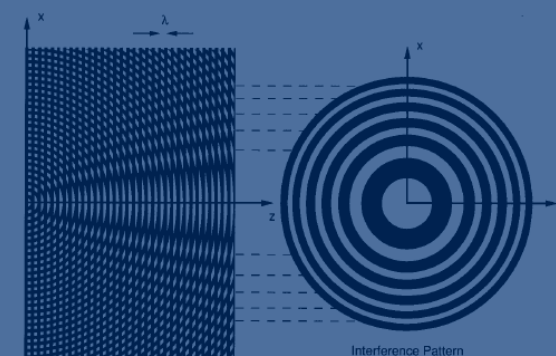
Аннотация. Монокристалл фторида лития (LiF) является широко используемым материалом в опытах при интенсивных динамических нагрузках в качестве окна для оптических методик, таких как VISAR или PDV. Он прозрачен и не испытывает фазовых переходов при ударном сжатии до ~200 ГПа. Для интерпретации экспериментальных данных, полученных с использованием такого окна, необходимо вводить поправочный коэффициент. Он связывает видимую массовую скорость, полученную экспериментально, с истинной массовой скоростью. Если для стационарных ударных волн этот коэффициент является постоянным, то для более сложных течений на него оказывает влияние пространственная неоднородность плотности окна. В работе проведены экспериментальные исследования ударно-волновых процессов во фториде лития при ударно-волновом сжатии при нагружении до 90 ГПа. Проведено математическое моделирование экспериментов. Для этого построена математическая модель одномерных упруго-пластических течений среды с использованием модели пластичности Прандтля–Рейса, а также построено уравнение состояния фторида лития. Поправочный коэффициент получен двумя способами: на основе зависимости показателя преломления от плотности и закона сохранения массы на ударной волне и зависимости оптической длины пути лазерного луча от распределения плотности в исследуемом материале.

Ключевые слова: математическое моделирование; показатель преломления; фторид лития; экспериментальные исследования; лазерные методики.

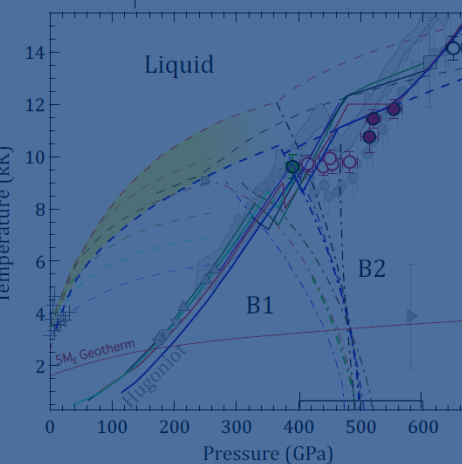
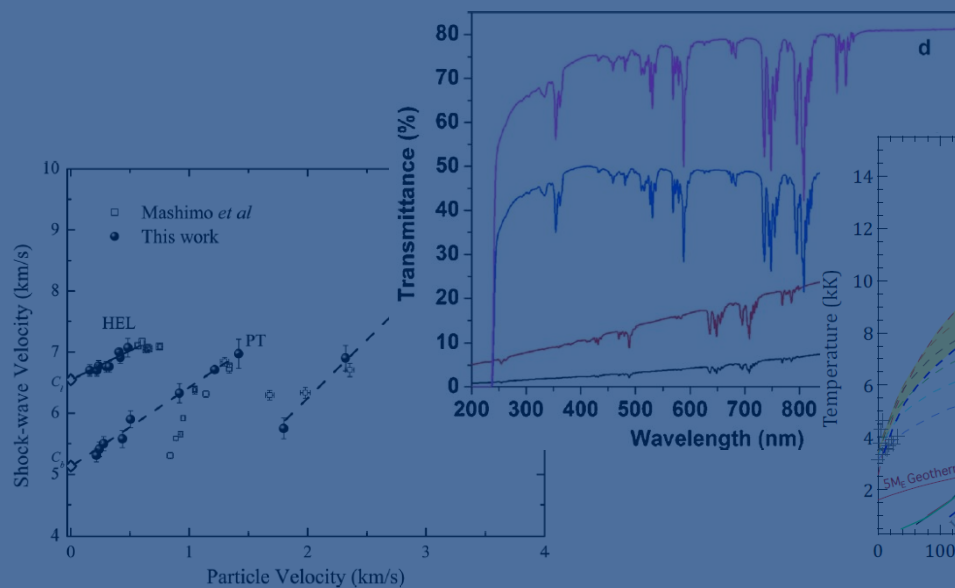
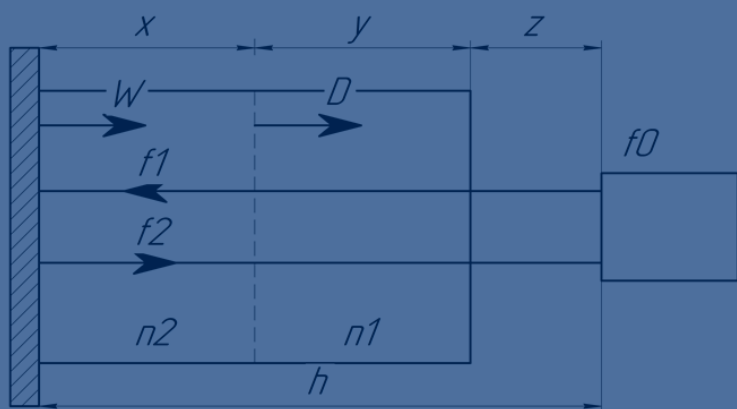


$$\text{OPD} = \text{OPL}_1 - \text{OPL}_2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right) \Delta\phi$$

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \text{OPD}$$



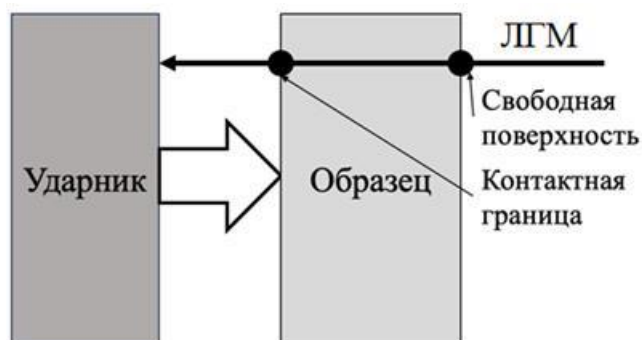
Теоретическое обоснование





Эффект Доплера — изменение частоты и, соответственно, длины волны излучения, воспринимаемой наблюдателем (приёмником), вследствие движения источника излучения относительно наблюдателя (приёмника). Если объект приближается к наблюдателю, то частота излучения увеличивается, если удаляется — то уменьшается. Совершенно не важно, движется источник, или приёмник, или они оба движутся, важно их взаимное движение относительно друг друга.

Оптическая длина пути (OPL) — это произведение геометрической длины пути света, проходящего через систему, и показателя преломления среды, через которую он распространяется. Это понятие определяет фазу света и управляет интерференцией и дифракцией света при его распространении. Согласно принципу Ферма, световые лучи можно охарактеризовать как кривые, оптимизирующие длину оптического пути.



Эффект Доплера будет зависеть от скорости приращения геометрической длины h_r

$$h_r = x_r + y_r + z_r$$

Приращение геометрической длины равно:

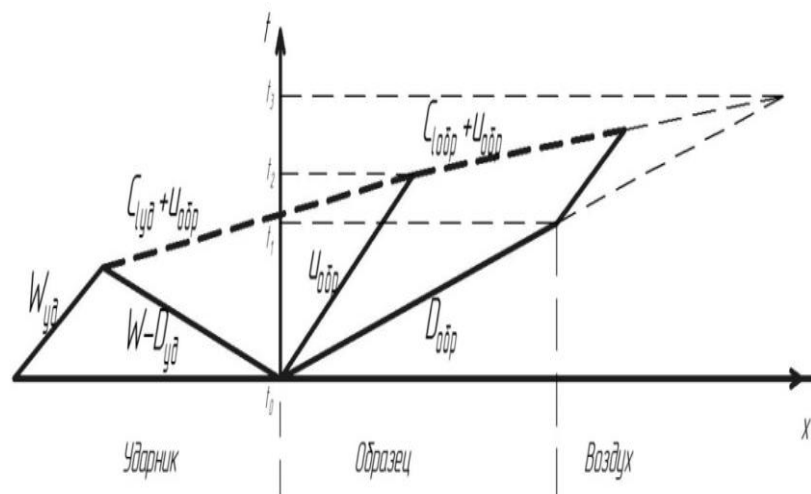
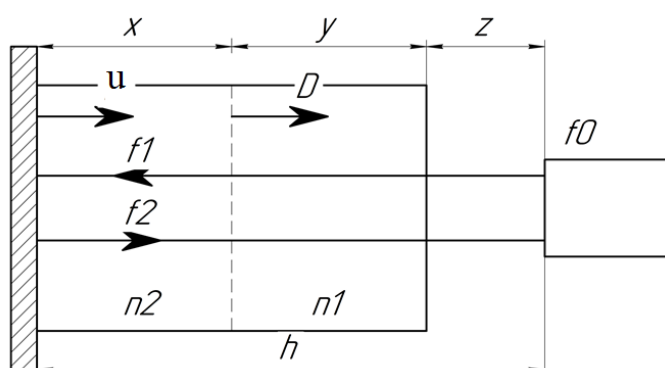
$$\Delta x_r = D \cdot n_2 \cdot \Delta t - u \cdot n_2 \cdot \Delta t$$

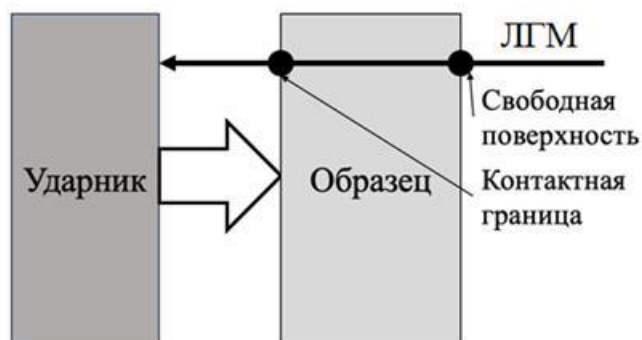
$$\Delta y_r = h_0 \cdot n_1 - D \cdot n_1 \cdot \Delta t$$

$$\Delta h_r = h_0 \cdot n_1 - \Delta x_r - \Delta y_r$$

Скорость изменения геометрической длины определяется производной приращения по времени:

$$v = \frac{dh}{dt} = D \cdot n_1 - D \cdot n_2 + u \cdot n_2$$





Эффект Доплера, когда образец является приёмником, будет выражаться формулой:

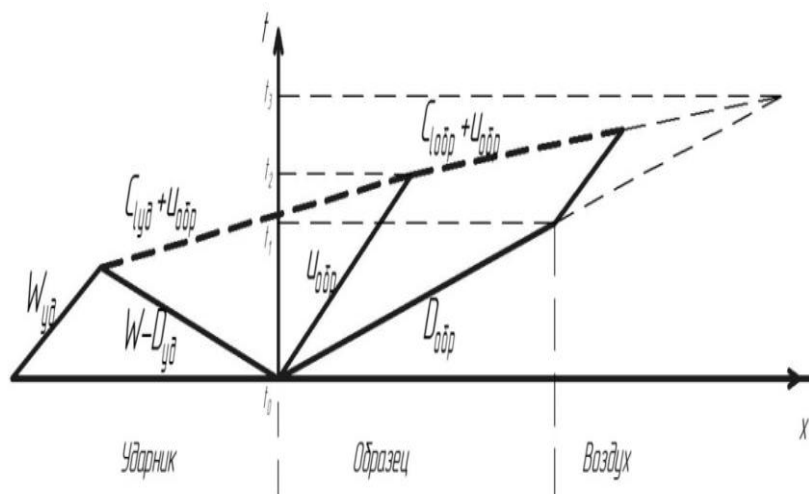
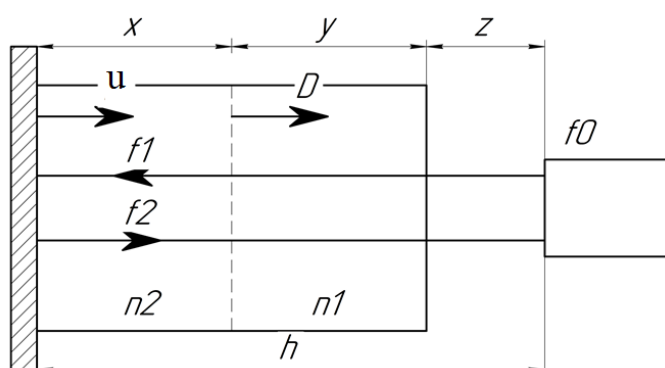
$$f_1 = f_0 \cdot \frac{c + v}{c} = f_0 \cdot \frac{c + D \cdot n_1 - D \cdot n_2 + u \cdot n_2}{c}$$

Эффект Доплера, когда образец является источником, будет выражаться формулой:

$$f_2 = f_0 \cdot \frac{c}{c - v} = f_0 \cdot \frac{c}{c - D \cdot n_1 + D \cdot n_2 - u \cdot n_2}$$

Разность частот, регистрируемая комплексом равна:

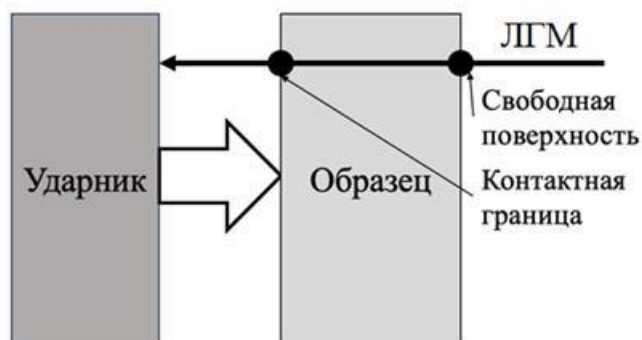
$$\Delta f = f_2 - f_0 \approx \frac{2}{\lambda} \cdot (D \cdot n_1 + D \cdot n_2 - u \cdot n_2)$$



Теоретическое обоснование



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



$$\Delta f = f_2 - f_0 \approx \frac{2}{\lambda} \cdot (D \cdot n_1 + D \cdot n_2 - u_{\text{ист}} \cdot n_2)$$

$$u_{\text{изм}} = \frac{\Delta f \cdot \lambda}{2}$$

Истинная скорость $u_{\text{ист}}$ определяется формулой:

$$D_{\text{ист}} = \frac{D_{\text{изм}}}{n_1} \quad u_{\text{ист}} = \frac{u_{\text{изм}} + D \cdot (n_2 - n_1)}{n_2}$$

$$n = n_0 - k + k \frac{\rho}{\rho_0} = a + b\rho;$$

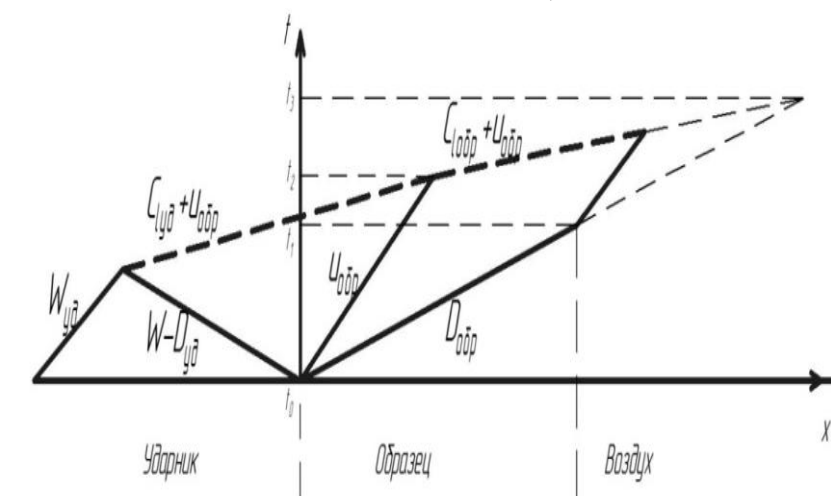
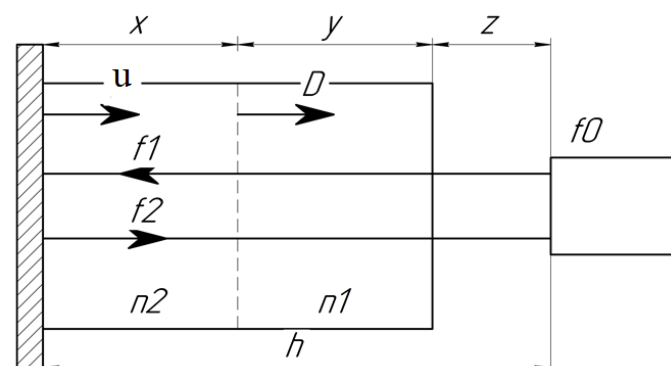
$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{D}{D - u_{\text{ист}}}$$

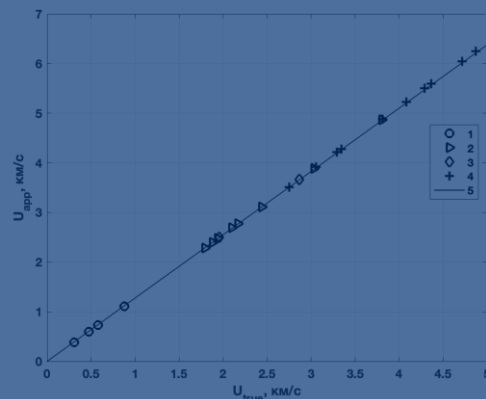
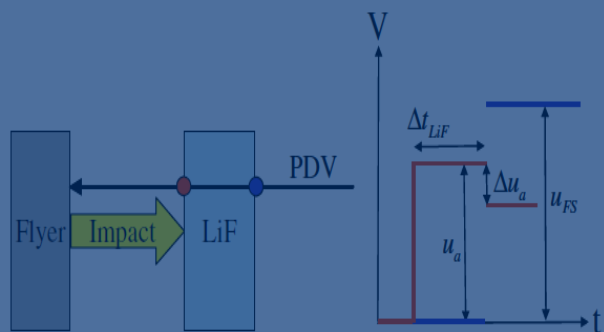
$$a = n_0 - k \quad b = \frac{k}{\rho_0}$$

$$n_1 = a + b\rho_0$$

$$n_2 = a + b\rho$$

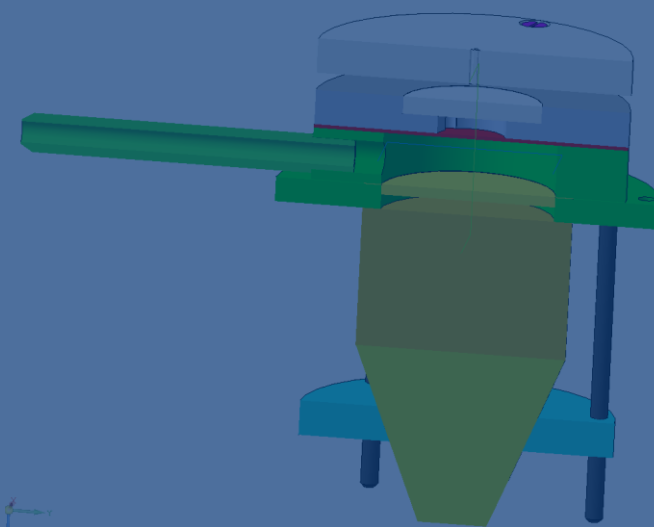
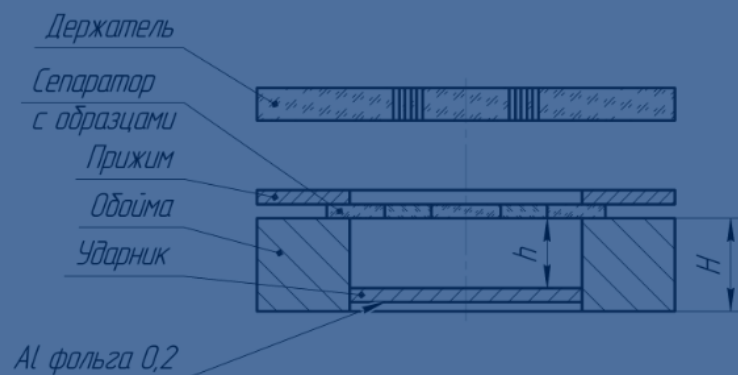
$$u_{\text{ист}} = \frac{u_{\text{изм}}}{a}$$





№ канала- ЛПМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
опыт № Т116/2154 от 10.03.23, ($W_{зд}=1,9$ км/с), $\sigma_{xx}=-16,5$ ГПа												
$W_{зд}$, км/с	-	-	-	-	-	-	1,88	-	-	-	-	1,9
$u_{инд}$, км/с	1,66	1,66	1,63	1,63	1,63	1,62	1,6	1,61	1,56	1,66	1,60	1,56
$\Delta u_{инд}$, км/с	0,10	0,18	0,07	0,05	0,17	0,04	0,15	0,16	0,12	0,15	0,09	0,19
$W_{обр}$, км/с	2,5	2,5	2,5	2,43	2,48	2,48	2,43	2,5	2,36	2,46	2,49	2,41
a	1,07	1,07	1,03	1,02	1,02	1,02	1,06	1,06	1,05	1,06	1,03	1,08
$a_{ср.зн.}$	1,052±0,021 при t_s (для $n=12$) = 2,179 для $\sigma=0,95$											
опыт № К522/2154 от 22.03.23, ($W_{зд}=3,06$ км/с), $\sigma_{xx}=-28,7$ ГПа												
$W_{зд}$, км/с	-	-	-	3,07	3,06	3,06	3,06	3,06	-	3,07	-	-
$u_{инд}$, км/с	2,62	2,59	2,61	2,61	2,59	2,60	2,57	2,59	2,61	2,61	2,29*	2,63
$\Delta u_{инд}$, км/с	0,76	0,62	0,69	0,66	0,77	0,8	0,8	0,74	0,76	0,76	0,65	2,63
$W_{обр}$, км/с	3,84	3,9	3,92	3,83	3,83	3,97	3,9	3,85	3,92	3,92	3,69	3,88
a	1,19	1,15	1,17	1,17	1,19	1,20	1,20	1,19	1,19	1,20	1,18	1,17
$a_{ср.зн.}$	1,186±0,015 при t_s (для $n=12$) = 2,179 для $\sigma=0,95$											
Т119/2154 от 06.04.23, ($W_{зд}=4,0$ км/с), $\sigma_{xx}=-41,5$ ГПа												
$W_{зд}$, км/с	4,01	4,00	4,01	4,03	4,01	4,04	4,02	3,98	4,01	4,04	4,02	4,01
$u_{инд}$, км/с	3,40	3,46	3,27	3,37	3,32	3,39	3,34	3,36	3,36	3,33	3,15	3,47
$\Delta u_{инд}$, км/с	1,27	1,33	1,14	1,24	1,22	1,29	1,21	1,17	1,20	1,16	1,32	1,42
$W_{обр}$, км/с	5,01	4,77	5,0	4,99	5,09	5,05	4,93	4,74	4,9	4,78	5,04	5,14
a	1,25	1,27	1,23	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,24	1,24	1,26	1,27
$a_{ср.зн.}$	1,252±0,014 при t_s (для $n=12$) = 2,179 для $\sigma=0,95$											

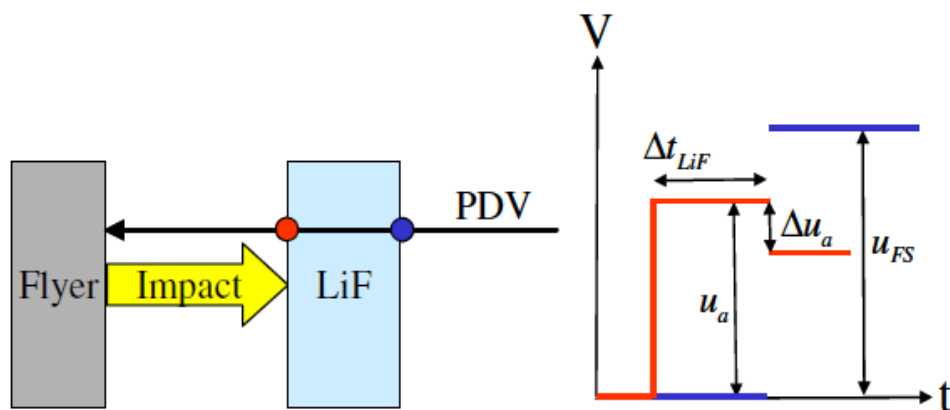
Постановка эксперимента



Постановка эксперимента



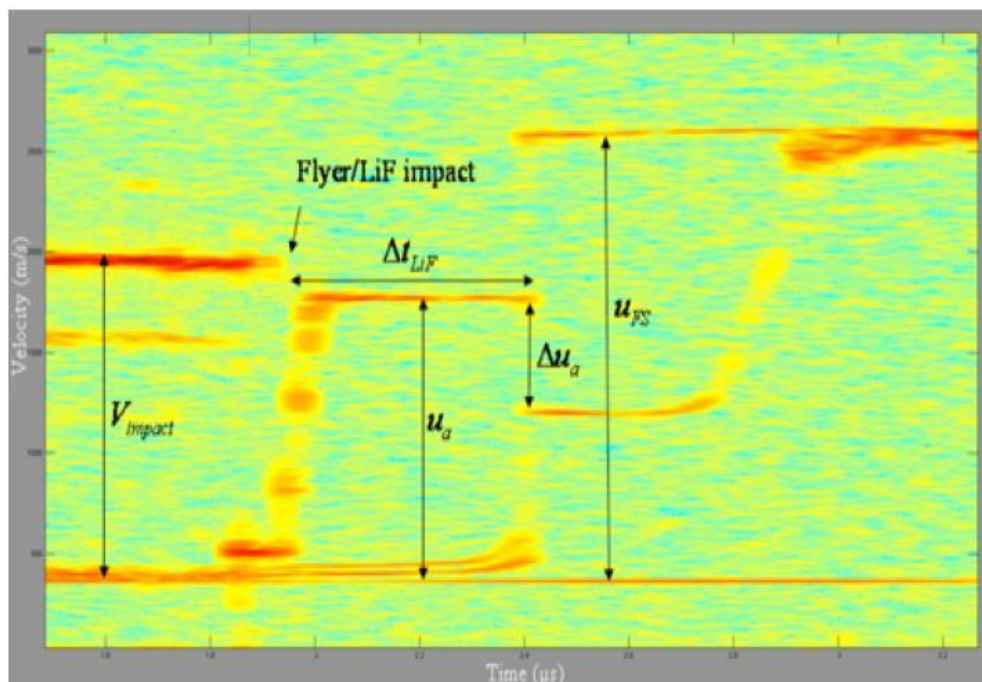
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Постановка экспериментов по определению поправочных коэффициентов описана в работе^[1,2]. Используется нагружение исследуемого материала при помощи ударника с одновременной регистрацией «видимой» массовой скорости Δu_a и скорости свободной поверхности исследуемого образца u_{FS} рисунок 1.

Коэффициент определяется по формуле

$$a = 1 + \frac{\Delta u_a}{u_{fs}}$$



JOURNAL OF APPLIED PHYSICS **114**, 043518 (2013)



A novel approach to Hugoniot measurements utilizing transparent crystals

D. E. Fratanduono, J. H. Eggert, M. C. Akin, R. Chau, and N. C. Holmes
Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550, USA

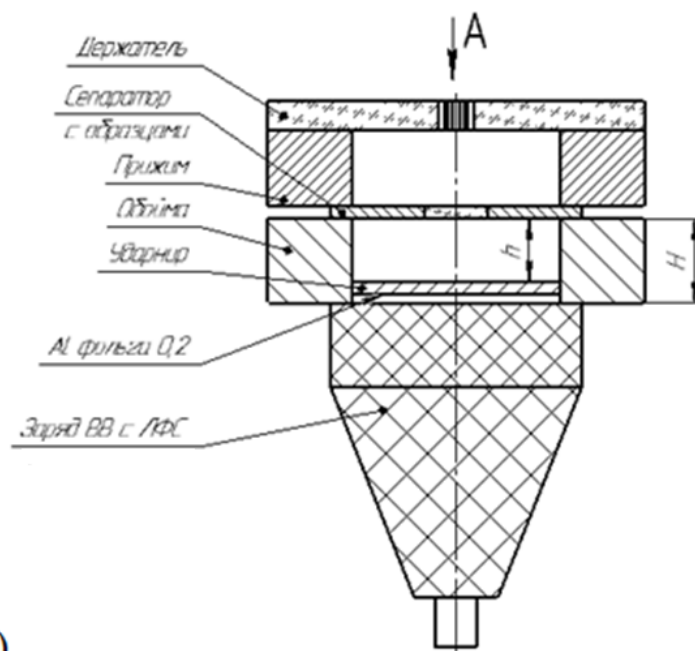
(Received 15 April 2013; accepted 26 June 2013; published online 26 July 2013)

A new absolute equation of state measurement technique is described and demonstrated measuring the shock state and the refractive index of MgO up to 226 GPa. This technique utilizes steady shock waves and the high-pressure transparency of MgO under dynamic shock compression and release. Hugoniot measurements performed using this technique are consistent with the previous measurements. A linear dependence of the shocked refractive index and density is observed up to 226 GPa, over a magnitude greater in pressure than previous studies. The transparency of MgO along the principal Hugoniot is higher than any other material reported to date. We observe a significant change in the refractive index of MgO as the Hugoniot elastic limit is exceeded due to the transition from uniaxial to hydrostatic strain. Measurements of the elastic-plastic two-wave structure in MgO indicate a nucleation time for plastic deformation. © 2013 AIP Publishing LLC. [<http://dx.doi.org/10.1063/1.4813871>]

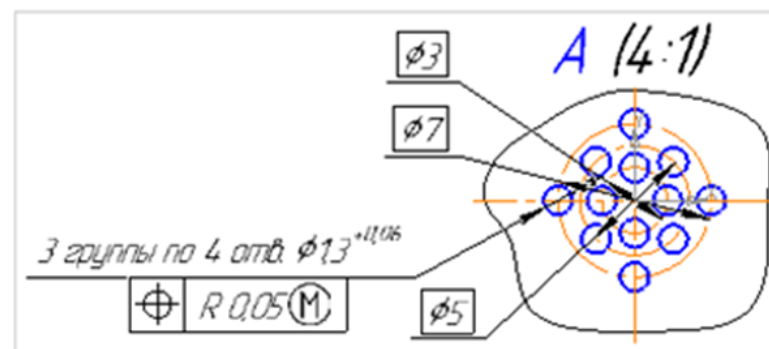
Постановка эксперимента



РФЯЦ-ВНИИФ
РОСАТОМ

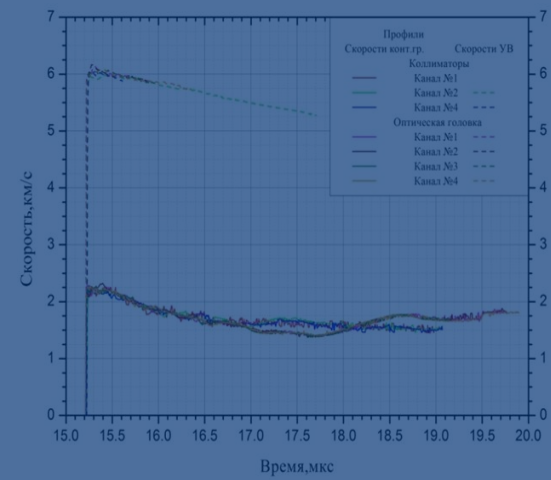
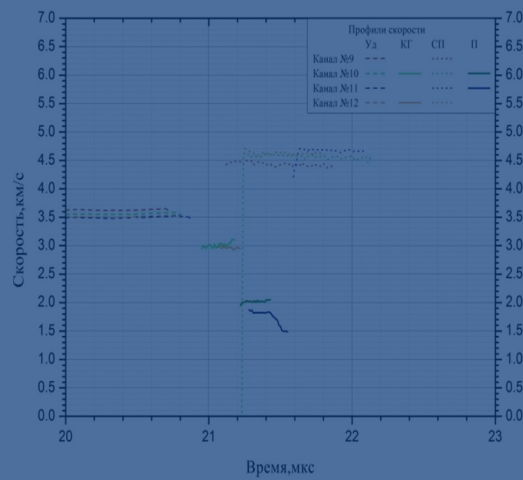
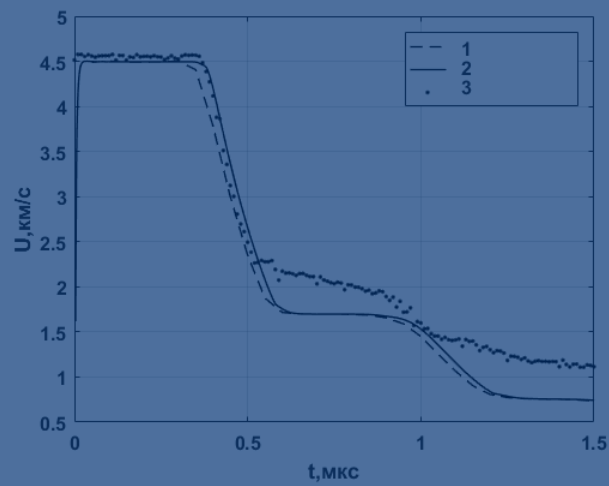


а)

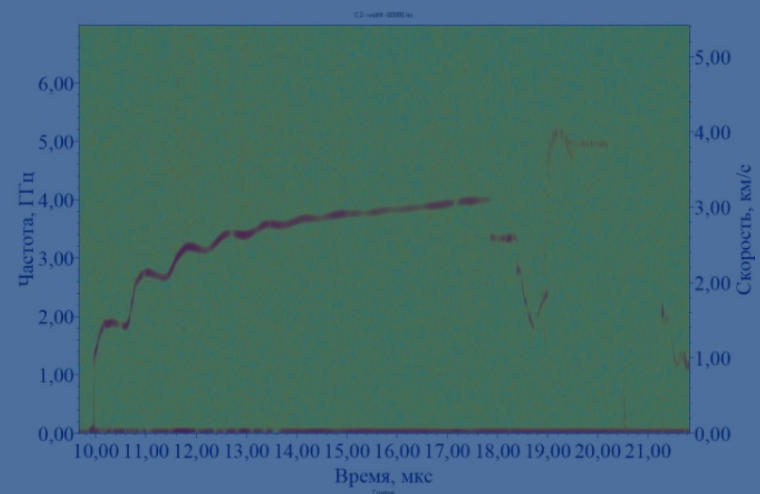
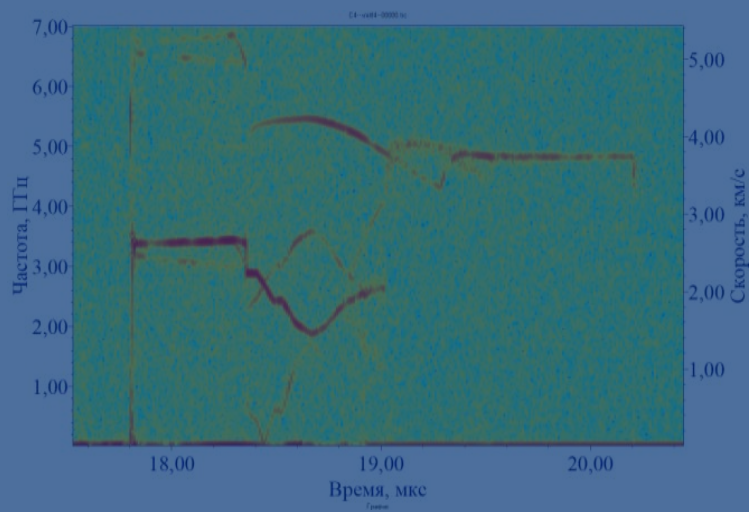


б)

Нагружающее устройство		№1	№2	№3	№4
		Ударник 12X18H10T, h=3 мм	12X18H10T, h=3 мм	12X18H10T, h=3 мм или h=2 мм	12X18H10T, h=2 мм
	W_{yA} км/с	0,9 (полет 15мм)	1,9 (полет 15мм)	3,0 (полет 20мм)	4,0 (полет 20мм)
	Образец	MgO, h=3 мм			
	$P_{обр}$ ГПа	14,0	31,0	52,0	82,0
	Образец	YAG, h=5 мм			
	$P_{обр}$ ГПа	23,0	55,0	85,0	107,0
	Образец	GGG, h=5 мм			
	$P_{обр}$ ГПа	22,0	42,0	69,0	104,0



Результаты



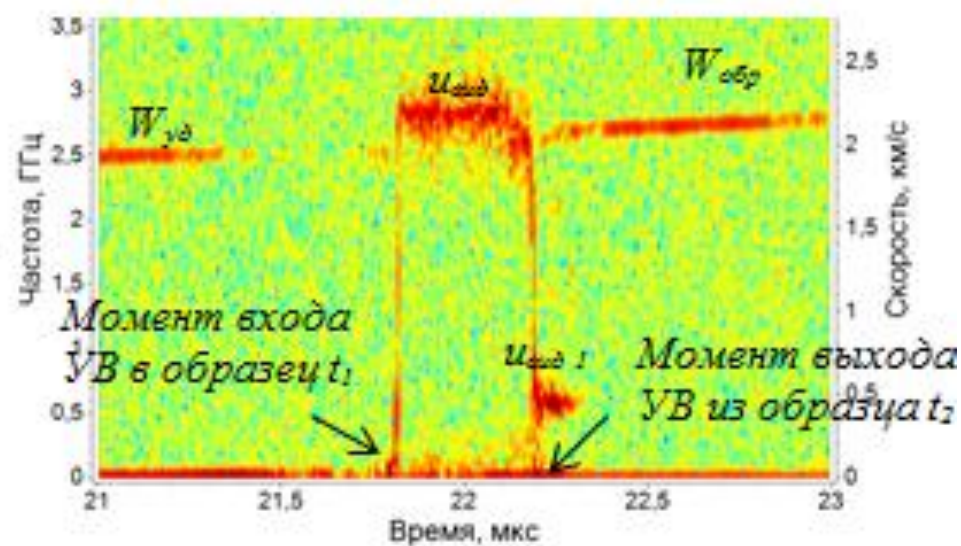
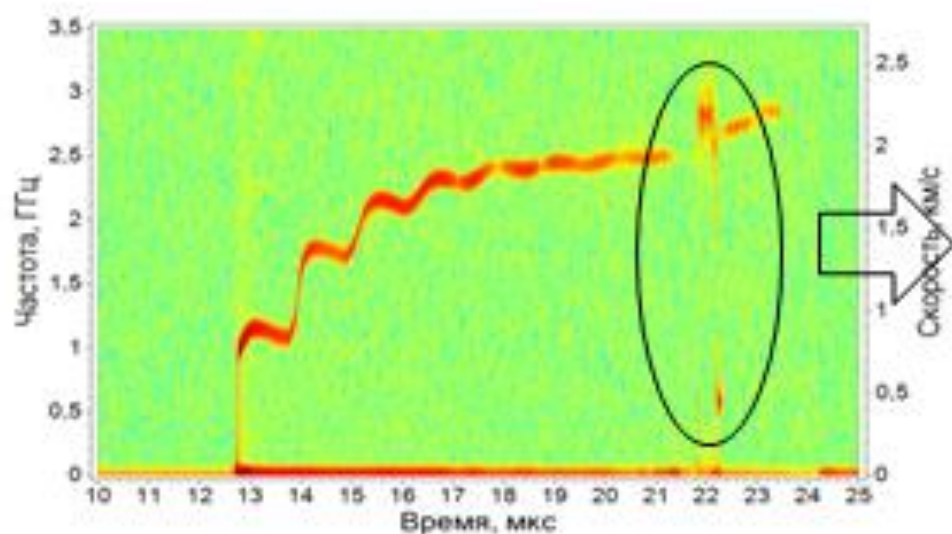
Результаты



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Периклаз MgO , $n_0=1,715$, $\rho_0=3,58 \text{ г/см}^3$

№ опыта	T103/2154 от 10.11.22	T104/2154 от 10.11.22	K510/2154 от 22.11.22	K511/2154 от 22.11.22	T111/2154 от 02.02.23
Ударник	12X18H10T, Ø50				
Толщина, мм	3,00	2,97	2,98	2,00	2,00
База полёта, мм	15,0	15,0	19,9	20,0	20,0
$W_{\text{уд.ожд.}}$ км/с	0,9	1,9	3,0	4,0	3,0
Размер образца	Ø20×3				
$\sigma_{\text{хх.обр.}}$ ГПа	14	31	52	82	52



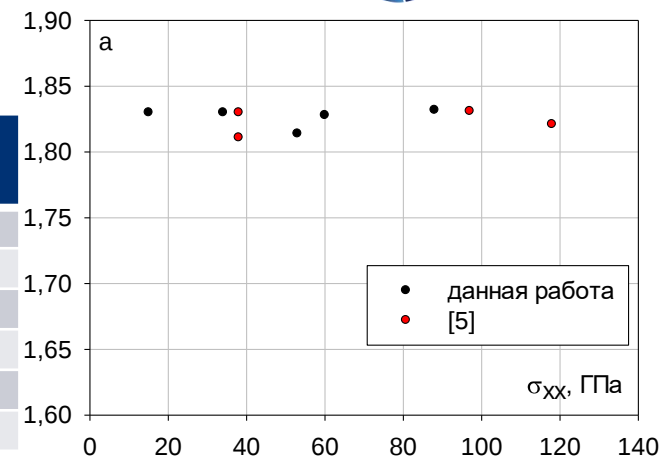
Результаты



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Периклаз MgO, $n_0=1,715$, $\rho_0=3,58$ г/см³

№ опыта	T103/2154 от 10.11.22	T104/2154 от 10.11.22	K510/2154 от 22.11.22	K511/2154 от 22.11.22	T111/2154 от 02.02.23
Ударник	12X18H10T, Ø50				
Толщина, мм	3,00	2,97	2,98	2,00	2,00
База полёта, мм	15,0	15,0	19,9	20,0	20,0
$W_{уд.ожд.}$ км/с	0,9	1,9	3,0	4,0	3,0
Размер образца	Ø20×3				
$\sigma_{xx,обр.}$ ГПа	14	31	52	82	52



№ канала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
опыт T103/2154 от 10.11.22 ($W_{\text{уп}} = 0,95$ км/с) $\sigma_{\text{xx факт}} = 15$ ГПа												
a	1,826	1,827	1,822	1,840	1,835	1,829	<u>1,867</u>	-	1,829	-	1,829	<u>1,716</u>
a _{средн}	1,830±0,014 ts (n=8) = 2,306											
опыт T104/2154 от 10.11.22 ($W_{\text{уп факт}} = 1,95$ км/с), $\sigma_{\text{xx факт}} = 34$ ГПа												
a	1,842	1,819	1,842	1,829	1,837	1,835	1,820	1,828	1,833	1,814	1,816	-
a _{средн}	1,830±0,014 ts (n=11) = 2,201											
опыт K510/2154 от 22.11.22 ($W_{\text{уп}} = 2,9$ км/с), $\sigma_{\text{xx факт}} = 53$ ГПа												
a	1,817	1,811	1,800	1,810	1,814	1,825	1,824	<u>1,778</u>	1,806	1,805	-	-
a _{средн}	1,814±0,014 ts (n=8) = 2,306											
опыт K511/2154 от 22.11.22 ($W_{\text{уп факт}} = 4,02$ км/с), $\sigma_{\text{xx факт}} = 88$ ГПа												
a	1,836	1,837	1,827	1,837	1,826	1,830	1,829	1,839	-	1,831	-	-
a _{средн}	1,832±0,013 ts (n=9) = 2,262											
опыт T111/2154 от 02.02.23 ($W_{\text{уп факт}} = 3,02$ км/с), $\sigma_{\text{xx факт}} = 60$ ГПа												
a	1,830	1,834	1,826	1,820	1,826	1,823	1,829	-	1,829	1,830	1,829	-
a _{средн}	1,828±0,013 ts (n=10) = 2,262											

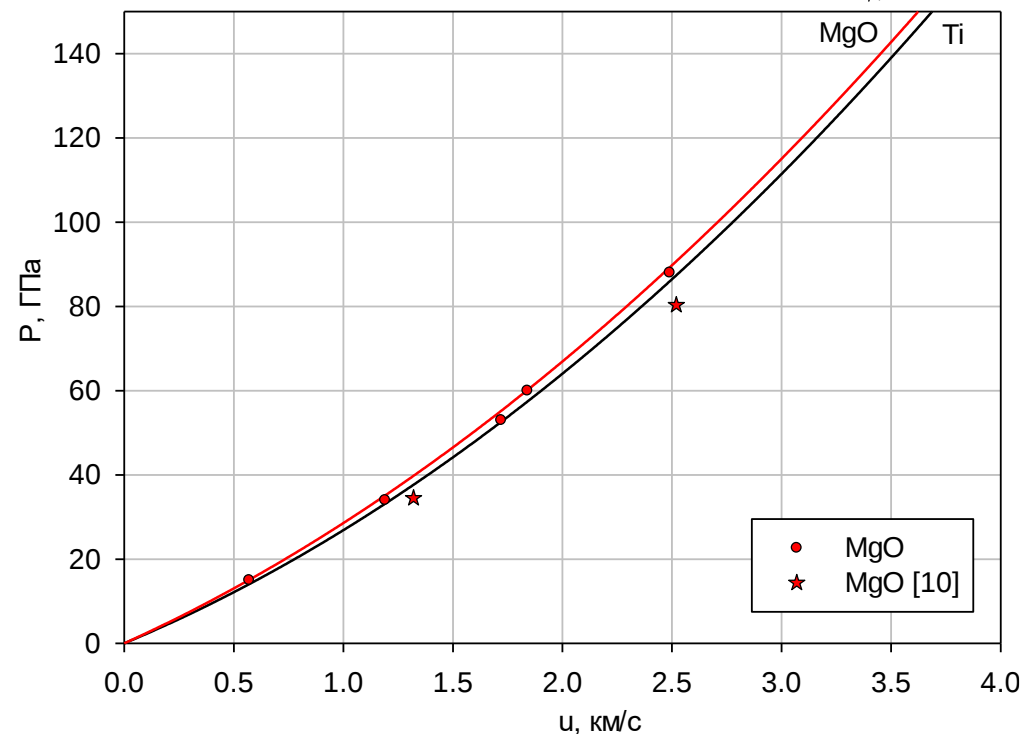
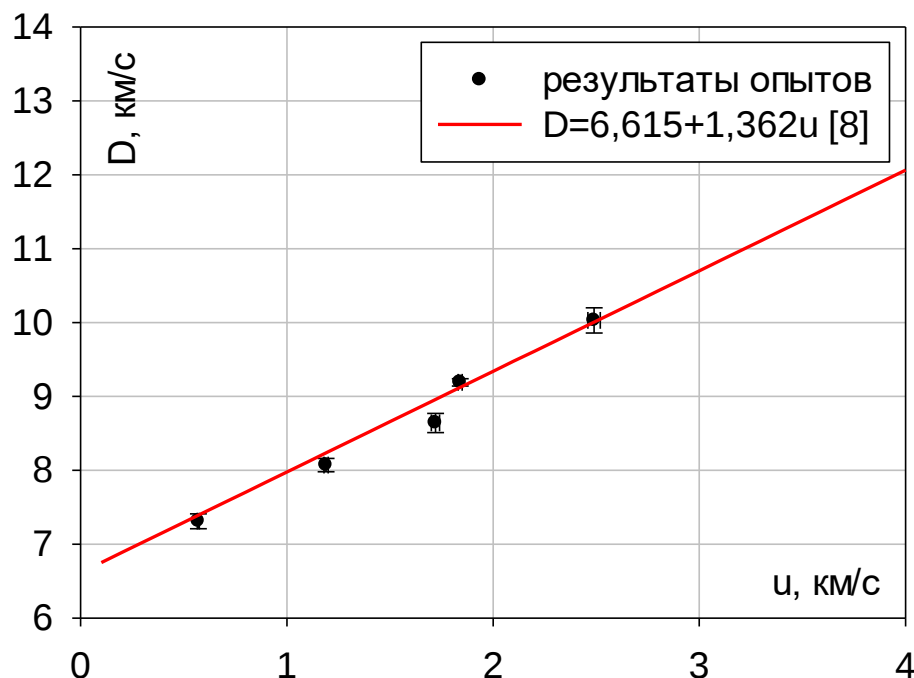
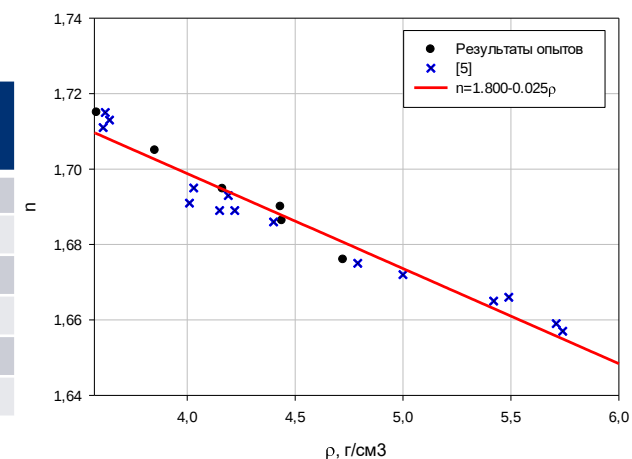
Результаты



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Периклаз MgO, $n_0=1,715$, $\rho_0=3,58 \text{ г/см}^3$

№ опыта	T103/2154 от 10.11.22	T104/2154 от 10.11.22	K510/2154 от 22.11.22	K511/2154 от 22.11.22	T111/2154 от 02.02.23
Ударник	12X18H10T, Ø50				
Толщина, мм	3,00	2,97	2,98	2,00	2,00
База полёта, мм	15,0	15,0	19,9	20,0	20,0
$W_{\text{уд.ожд.}}$ км/с	0,9	1,9	3,0	4,0	3,0
Размер образца	Ø20×3				
$\sigma_{\text{хх образ}}$ ГПа	14	31	52	82	52



5 - D. E. Fratanduono, J. H. Eggert, M. C. Akin, R. Chau, and N. C. Holmes A novel approach to Hugoniot measurements utilizing transparent crystals. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 114, 043518 (2013). P.114

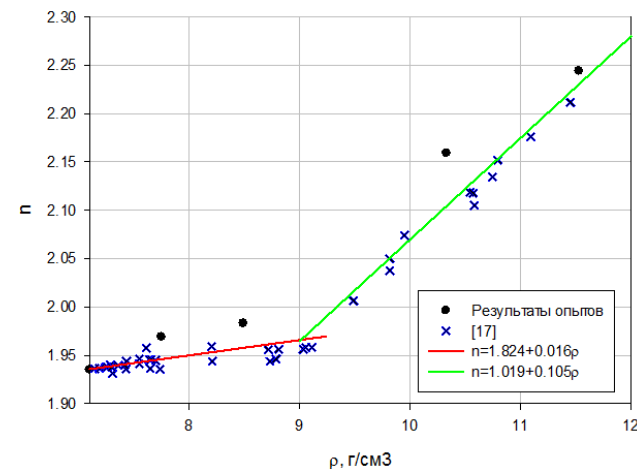
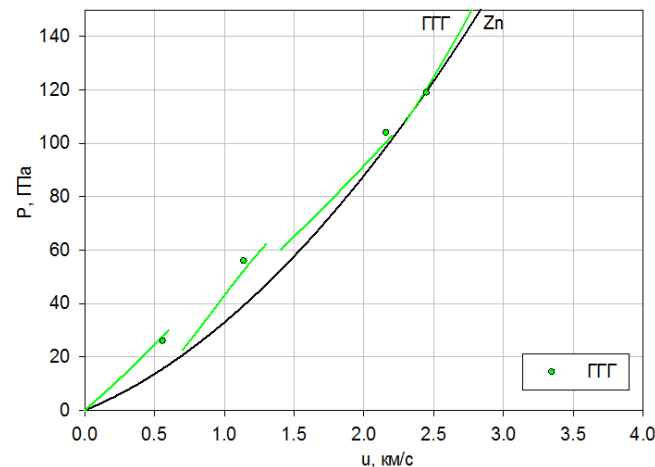
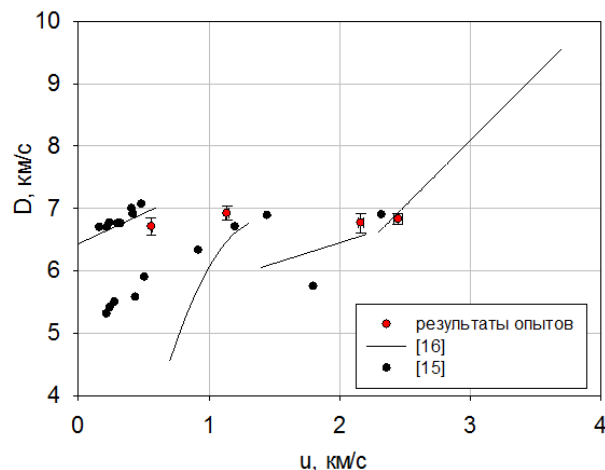
8 - T.S. Duffy, T.J. Ahrens. Compressional Sound Velocity, Equation of State and Constitutive Response of Shock Compression Magnesium Oxide. Journal of Geophysical Research, vol.#100. No B1. P.529-542.

January 10, 1995.

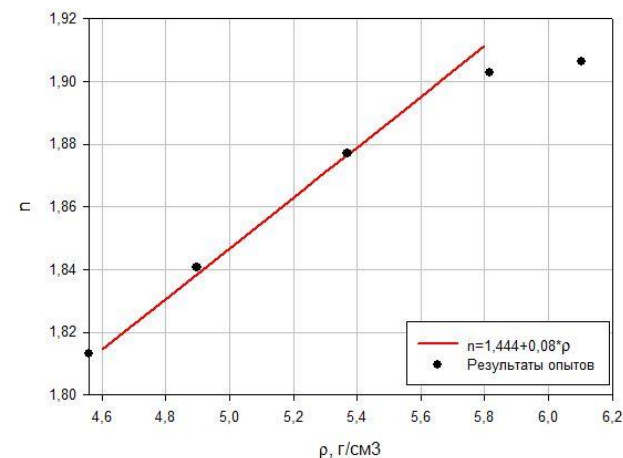
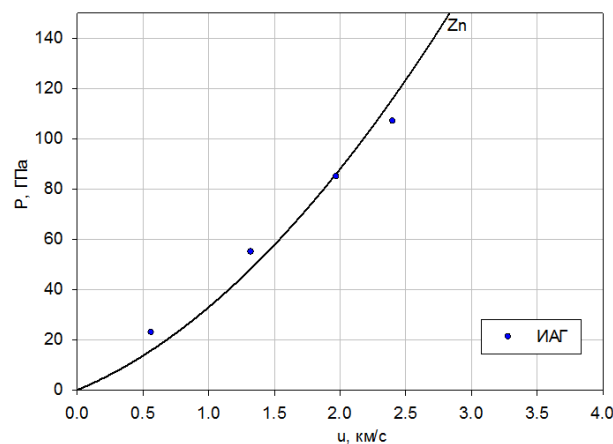
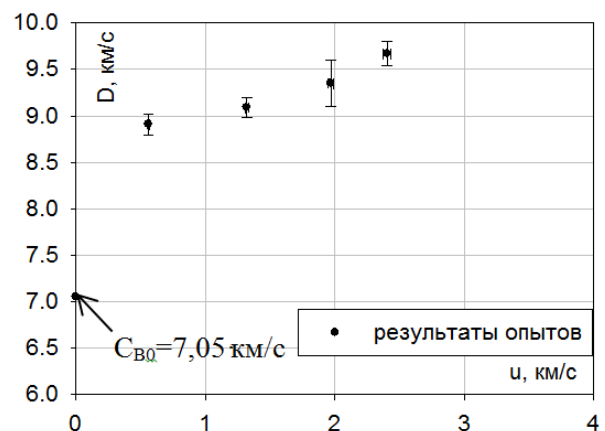
10 - Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ: Научное издание / П. ред. Р.Ф. Трунина. – 2-е изд., перераб. и доп.- Саров:

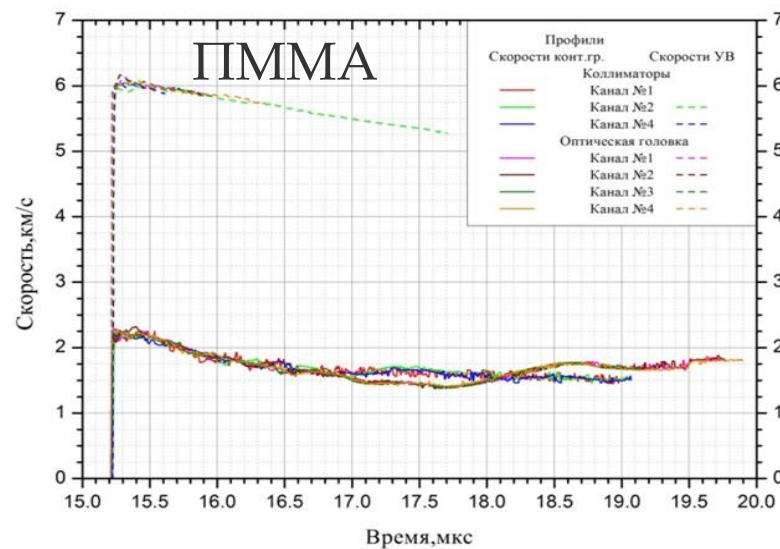
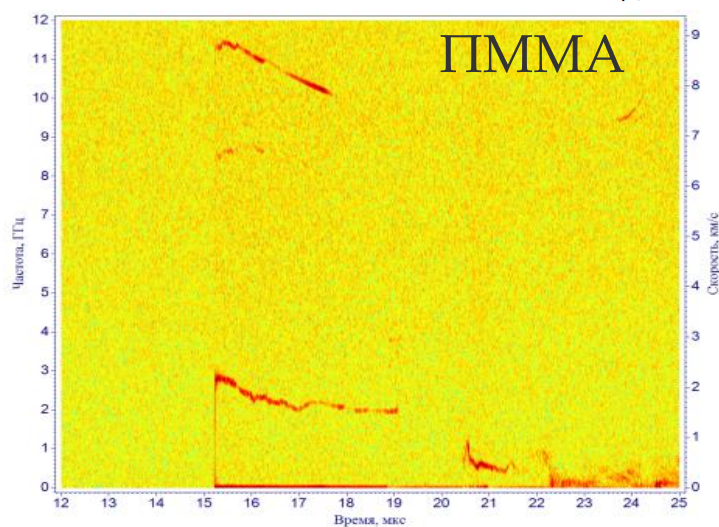
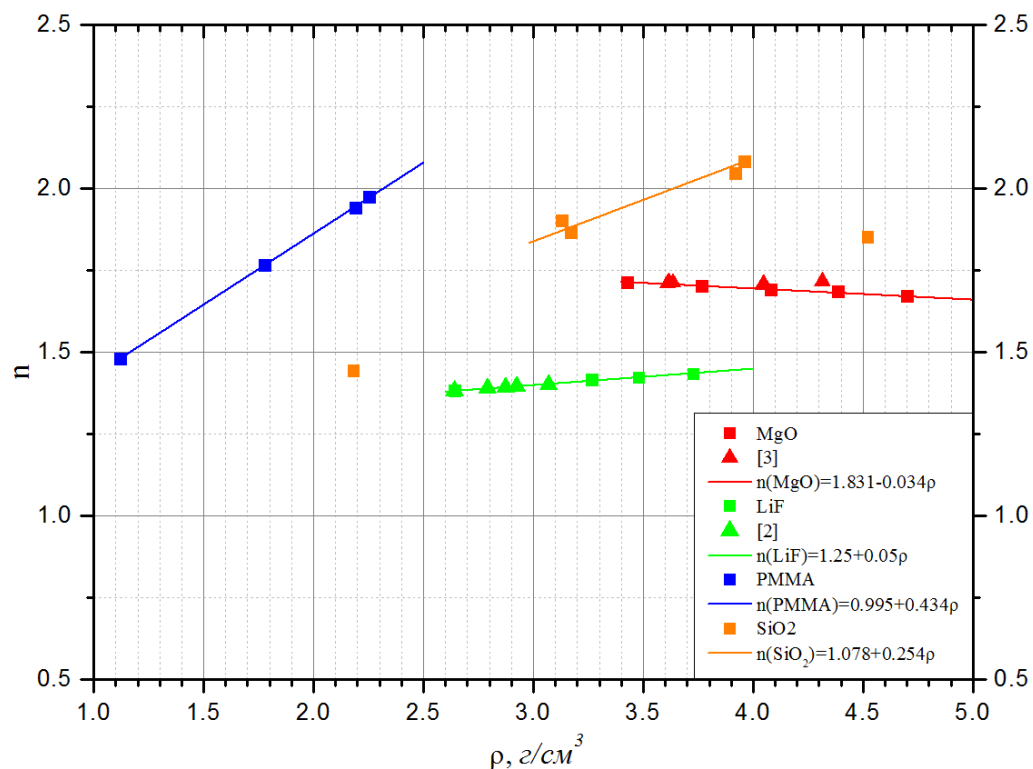
РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, 531 с.

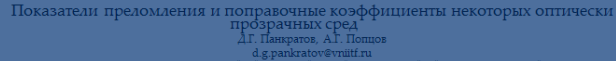
Галлий-гадолиниевый гранат, GGG, $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $n_0=1,935$, $\rho_0=7,1 \text{ г/см}^3$



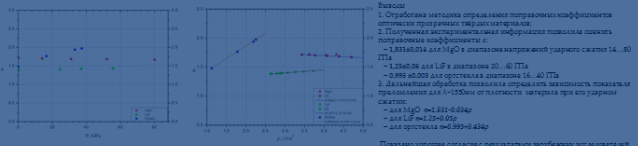
Иттрий-алюминиевый гранат, YAG, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, $n_0=1,813$, $\rho_0=4,56 \text{ г/см}^3$







Методика определения поправочного коэффициента, постановка экспериментов



Показано хорошее согласие с результатами зарубежных исследователей:

Показатели преломления и поправочные коэффициенты некоторых оптически прозрачных сред
Д.Г. Панкратов, А.Г. Попцов
d.g.pankratov@vniitf.ru

Методика определения поправочного коэффициента, постановка экспериментов

Показано хорошее согласие с результатами зарубежных по-

2. E. Frastone, J. A. Amato, J. A. Goldfarb, G. Langer, *Resonance Raman Spectroscopy of Polymers*, Wiley, New York, 1997.

3. E. J. Bowen, D. B. Holmberg, P. A. Figg, D. H. Holmberg, *Optical properties of polymers*, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 101, 033301 (2007).

4. D. E. Franzosino, J. H. Eggert, M. C. Allen, R. Chou, and S. C. Holmes, *A novel approach to Raman measurements utilizing transparent crystals*, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 114, 043503 (2013). P114

5. Экспериментальные данные по кинетике химического свечения и калориметрические расчеты скорости горения веществ, *Труды ФГБУ "Центр-Саров"* P04-18-2013-05, 2014, P104.

1. Отработана методика определения поправочных коэффициентов оптически прозрачных твёрдых материалов;
 2. Полученная экспериментальная информация позволила оценить поправочные коэффициенты a :
 - $1,25 \pm 0,06$ для LiF в диапазоне 20...60 ГПа
 - $1,077 \pm 0,02$ для SiO₂ в диапазоне 17...30 ГПа
 - $1,252 \pm 0,014$ для SiO₂ в диапазоне более 30 ГПа
 - 0.995 ± 0.003 для Оргстекла в диапазоне 16...40 ГПа
 3. Дальнейшая обработка позволила определить зависимость показателя преломления для $\lambda=1550$ нм от плотности материала при его ударном сжатии:
 - для LiF $n=1.25+0.05\rho$
 - для SiO₂ $n=1.077+0.254\rho$ в диапазоне 17...30 ГПа
 - для оргстекла $n=0.995+0.434\rho$
- Показано хорошее согласие с результатами зарубежных исследователей.

4. Выполнены исследования некоторых оптических свойств следующих оптически прозрачных сред:

- периклаз MgO ($\rho_0=3,58 \text{ г/см}^3$);
- иттрий-алюминиевый гранат $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (ИАГ, $\rho_0=4,56 \text{ г/см}^3$);
- галлий-гадолиниевый гранат $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (ГГГ, $\rho_0=7,1 \text{ г/см}^3$).

5. В данных материалах определены зависимости показателя преломления n и коэффициента пересчёта a от давления (плотности) материала $n(P)$, $a(P)$ для длины волны излучения 1550 нм:

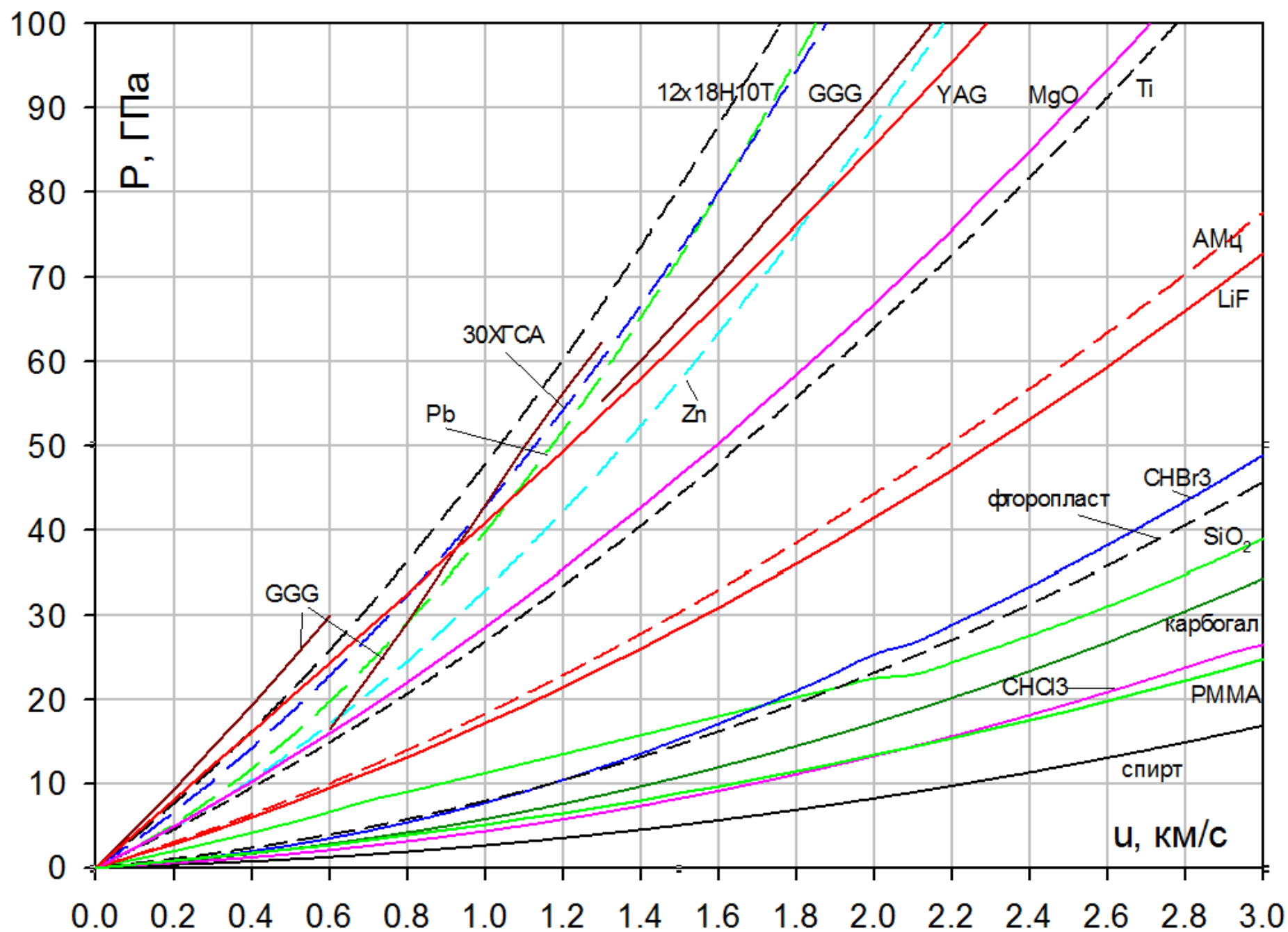
- MgO : $a = 1,826 \pm 0,009$ – не зависит от напряжения в MgO ; $n(\rho) = 1,826 - 0,025\rho$;
- GGG : $a = 1,426 + 0,0045\sigma_{xx}$ (σ_{xx} в ГПа) до ~ 70 ГПа; в фазе высокого давления (выше 100 ГПа) $a = 1,027 + 0,0034\sigma_{xx}$ (σ_{xx} в ГПа); $n(\rho) = 1,426 + 0,016\rho$ до ~ 70 ГПа, $n(\rho) = 1,027 + 0,105\rho$ свыше 70 ГПа;
- YAG : $a = 1,372 + 0,0014\sigma_{xx}$ (σ_{xx} в ГПа) при $\sigma_{xx} = 0 \dots 110$ ГПа; $n(\rho) = 1,372 + 0,080\rho$ до ~ 80 ГПа.

6. Выполнен контроль D -и-соотношения :

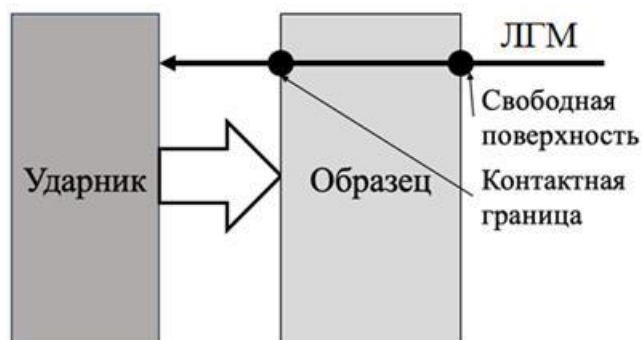
- MgO : в реализованном диапазоне напряжений до ~ 90 ГПа полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными [8] $D = 6,615 + 1,362u$;
- GGG : в реализованном диапазоне напряжений до ~ 120 ГПа полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными [16];
- YAG : реализован диапазон напряжений до ~ 110 ГПа, аппроксимацией результатов получена следующая зависимость - $D = 8,934 - 0,137u + 0,183u^2$.

**Спасибо за
внимание**





Теоретическое обоснование



Допущения:

- рассматривается случай с бесконечным ударником;
- для показателя преломления n приняты следующие зависимости:

$$n = n_0 - k + k \frac{\rho}{\rho_0} = a + b\rho; \quad \rho = \rho_0 \frac{D}{D - u}$$

$$u^*(t) = n_0 \cdot D(t) - n \cdot (D(t) - u(t))$$

$$u^*(t)$$

$$= n_0 \cdot D(t) - (n_0 - k + k \frac{D(t)}{D(t) - u(t)}) (D(t) - u(t))$$

$$u^*(t)$$

$$= n_0 \cdot D(t) - n_0 \cdot D(t) + n_0 \cdot u(t) + k \cdot D(t) - k \cdot u(t) - k \cdot D(t)$$

$$u^*(t) = n_0 \cdot u(t) - k \cdot u(t)$$

$$u^*(t) = (n_0 - k) \cdot u(t)$$

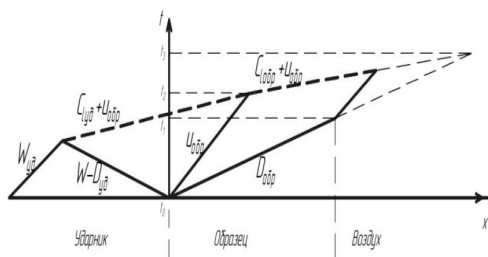
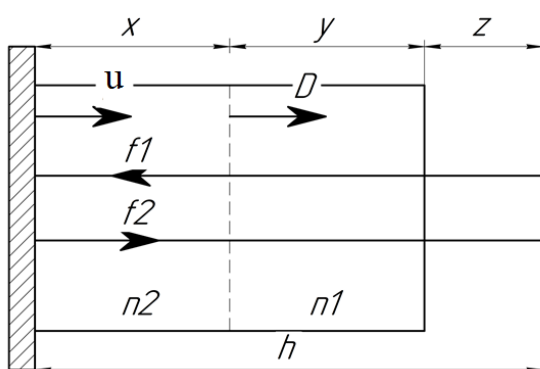
$$u^*(t) = a \cdot u(t)$$

$$a = n_0 - k$$

$$k = n_0 - a,$$

$$b = \frac{k}{\rho_0}$$

$$n(\rho) = a + b\rho$$



1. Interferometric windows characterization up to 450K for shock wave experiments: Hugoniot curves and refractive index. E. Fraizier, P. Antoine, J.-L. Godefroit, G. Lanier, and G. Roy. EPJ Web of Conferences 26, 01022 (2012)

2. Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry. B. J. Jensen, D. B. Holtkamp, P. A. Rigg, D. H. Dolan. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 101, 013523, 2007