



Federal Research Center of
Coal and Coal Chemistry SB RAS, Kemerovo



X International Voevodsky Conference
**Physics and Chemistry of
Elemental Chemical Processes**



Explosive decomposition of high explosives with inclusions of ultrafine metal particles under the influence of pulsed laser radiation

Aduev Boris P., Nurmukhametov Denis R., Belokurov
Gennadiy M., Liskov Igor Yu., Nelubina Nataliy V.

Лаборатория энергетических соединений и нанокompозитов

Заведующий лабораторией

д.ф.-м.н., профессор

Адуев Борис Петрович

Novosibirsk

05 - 09 Sep 2022

ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН, ЛЭСиНКо, lesinko-iuxm@yandex.ru

Материально-техническая база

Импульсный YAG:Nd³⁺-лазер LQ929 (SOLAR Laser Systems, г. Минск)

Режимы работы:

- Модуляция добротности (14 нс)
- Свободная генерация (120 мкс)

Характеристики:

Энергия в импульсе до 1,2 Дж

Частота следования импульсов до 10 Гц

Генерация гармоник – 532 нм, 355 нм, 266 нм



Электронный ускоритель ГИН-600

- энергия электронов 250 КэВ;
- плотность тока до 3 кА/см²;
- длительность импульса 2-20 нс.



Спектрофотохронограф СХ-1А (ООО «Научные и специальные прецизионные приборы и системы», г. Москва)

- спектральный диапазон 300-800 нм;
- спектральное разрешение 10 нм;
- диапазон развертки 160 нс – 2 мс;
- временное разрешение от 2 нс



Фотоэлектронные умножители Hamamatsu H-10707-21

Цифровые осциллографы TDS 7404B (4 ГГц), LeCroy WJ332A (300 МГц)

Пьезоакустические преобразователи

Фотометрический шар

Анализатор газов SRS QMS 30 (Диапазон масс От 1 до 300 м.е.)



НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

- **Лазерное инициирование взрыва ВВ.**

Исследуются механизмы преобразования энергии лазерного излучения во взрывчатых веществах, что позволит разработать новые светочувствительные нанокompозитные взрывчатые материалы для компонентов и устройств специального назначения

- **Нелинейное поглощение электромагнитного излучения наночастицами металлов.**

Исследуются процессы поглощения электромагнитного излучения в системе прозрачная матрица – наночастица металла, что позволит разработать новые подходы для функционирования целого класса технических приложений, таких как переключающие устройства лазерной оптики, солнечные батареи, фотокатализаторы, фотосинтетические и люминесцентные системы

- **Лазерное инициирование термохимических процессов в углях.**

Исследуются механизмы преобразования энергии лазерного излучения в твердых топливах, что позволит разработать новые способы зажигания твердого топлива

- **Получение синтез-газа и водорода из угля и суспензий металлических частиц под действием лазерного излучения.**

Исследуются механизмы реакций образования синтез-газа в процессах пиролиза и газификации углей при лазерном воздействии.

• Introduction

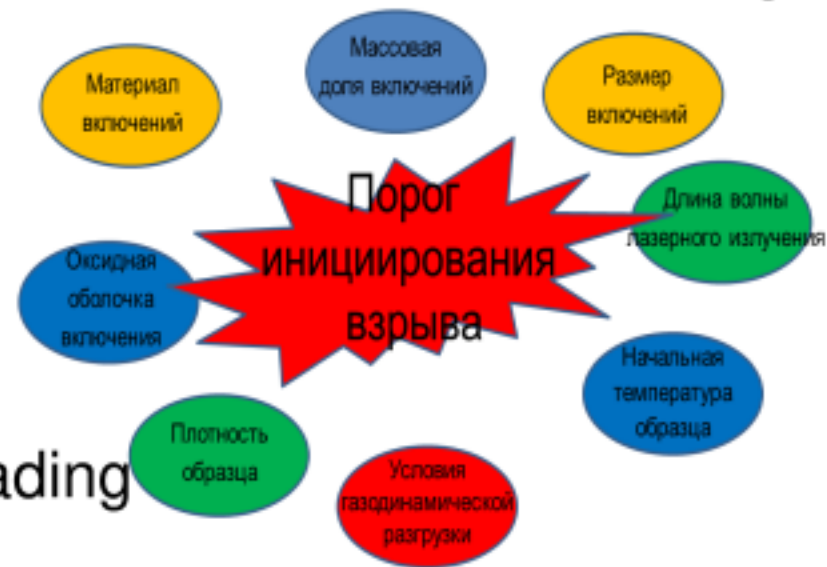
Laser initiation of explosives, as a scientific direction, arose in the USSR at VNIIA named after V.I. N.L. Dukhov (Moscow) [1,2]. In Russia, studies of the problems of laser initiation of explosives are currently being carried out at TPU (Tomsk) [3], KemSU (Kemerovo) [4], RFNC-VNIIEF (Sarov) [5], RFNC-VNIITF (Kommersk). Snezhinsk) [6], FRC UUH SB RAS (Kemerovo), SPbGTI(TU) (St. Petersburg) [7] and other organizations.

Lasers began to be used to detonate explosives in the so-called light detonators, whose noise immunity is much greater than that of electric detonators. For example, in the United States, light detonators are used in pyroautomatic systems of rocket and space complexes [8] and systems for initiating artillery shells [9].

1. А. А. Бриш, И. А. Галеев, Б. Н. Зайцев, Е. А. Сбитнев, Л. В. Татаринцев // Физика горения и взрыва. – 1966. – Т. 2 – № 3. – С. 132–138.
2. А. А. Бриш, И. А. Галеев, Б. Н. Зайцев, Е. А. Сбитнев, Л. В. Татаринцев // Физика горения и взрыва. – 1969. – Т. 5 – № 4. – С. 475–480.
3. Р. С. Буркина, Е. Ю. Морозова, В. П. Ципилев // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47 – № 5. – С. 95–105.
4. М. М. Kuklja, R. Tsyshevsky, A. S. Zverev, A. Mitrofanov, N. Ilyakova, S. N. Rashkeev // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2020. – Т. 22 – № 43. – С. 25284–25296.
5. Ю. В. Шейков, С. М. Батьянов, О. Н. Калашникова, О. М. Луковкин, Д. В. Мильченко, С. А. Вахмистров, А. Л. Михайлов // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54 – № 5. – С. 57–64.
6. В. И. Таржанов, В. И. Сдобнов, А. Д. Зинченко, А. И. Погребов // Физика горения и взрыва. – 2017. – Т. 53 – № 2. – С. 118–125.
7. М. А. Илюшин, И. В. Целинский, И. А. Угрюмов, А. С. Козлов, В. Ю. Долматов, И. В. Шугалей, А. Н. Головчак, А. В. Веденецкий, Д. В. Королев, В. Б. Остаев // Химическая физика. – 2005. – Т. 24 № 10. С. 49–56.
8. Blachowski, T. Development of an optical BNCP/HNS detonator for various aircrew escape system applications Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
9. T. J. KRUPA // Optics and Photonics News. – 2000. – Т. 11 – № 6. – С. 16.

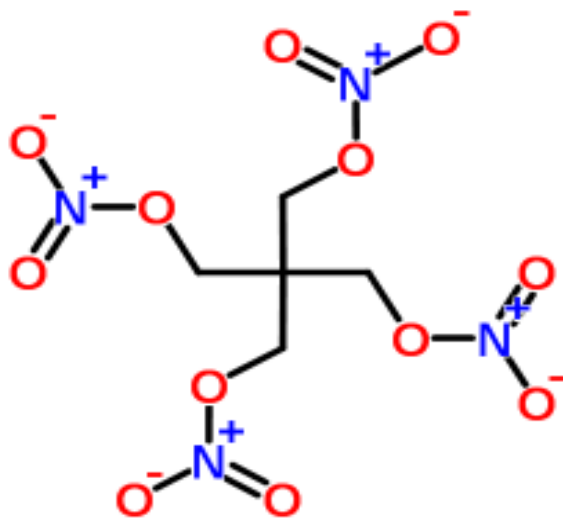
MULTIFACTORITY OF LASER INITIATION OF EXPLOSIVES

- Characteristics of laser radiation (wavelength, duration, etc.)
- Optical characteristics of the sample
- The presence of light-absorbing or light-scattering inclusions in the sample (defects, particles of metals, carbon-containing particles).
- Dispersion of inclusions
- Initial sample temperature
- Sample Density
- Conditions for gas dynamic unloading



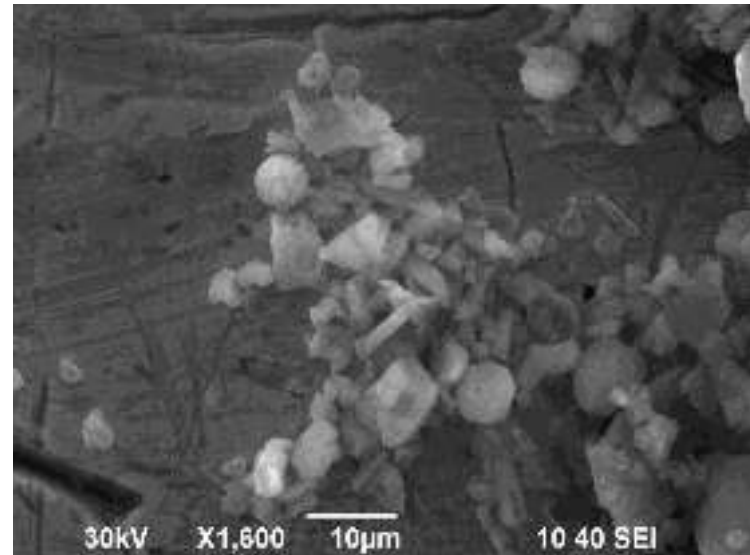
**Development of a Model for Laser
Initiation of Explosive Decomposition of
Low-Absorbing Radiation Brisant
Explosives with Inclusions of Ultrafine
Metal Particles**

Materials and equipment

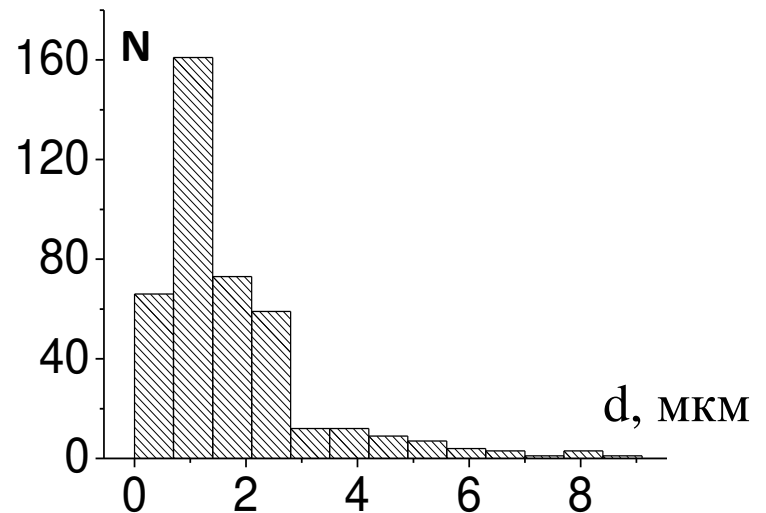


Structural formula of PETN

[dx.doi.org/10.1021/jp312492v1](https://doi.org/10.1021/jp312492v1) | *J. Phys. Chem. A* 2013, 117, 6043–6051



Тетранитрат пентаэритрита (тэн, PETN)	
Химическая формула	$(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4\text{C}$
Молекулярная масса	$316,2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
Плотность монокристалла	$1,773$ г/см ³
$T_{\text{плав}}$	413 К (140 °С)
$T_{\text{вспышки}}$	488 К (215 °С)

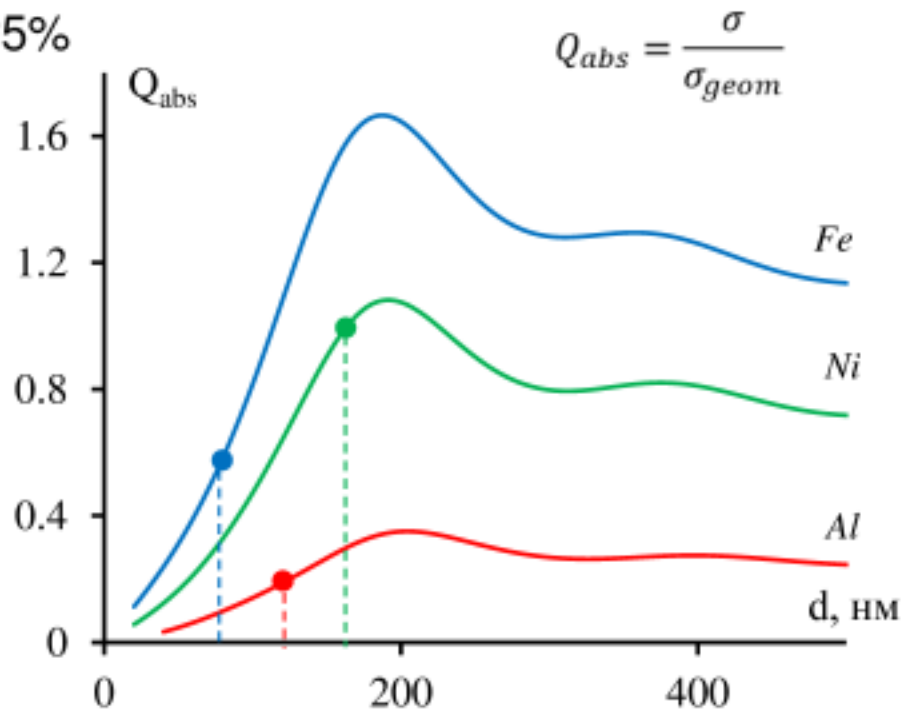


Micrograph and histogram of PETN particle size distribution

Орлова, Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ / Е. Ю. Орлова / под ред. Л.Б. Мясниковой. -- Л.: "Химия," 1973. -- 688с.

Ultrafine metal particles

- **Aluminum** (gas-phase synthesis method, particle size at the distribution maximum 120 nm, oxide content 27%)
- **Nickel** (chemical synthesis particle sizes in the distribution maximum 280, 160, 130 nm, oxide content 12%)
- **Iron** (electroexplosive method, particle size at the distribution maximum 75 nm, oxide content 25%)



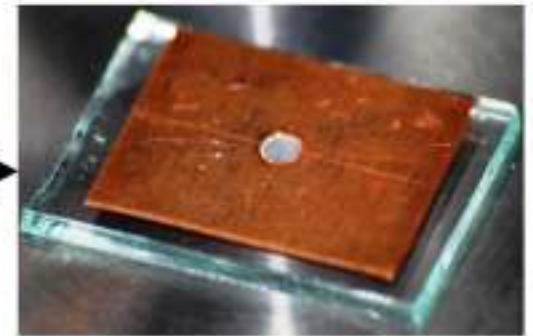
Dependence of the coefficient of light absorption efficiency Q_{abs} with a wavelength of 1064 nm by metal inclusions Al, Ni, Fe in the PETN matrix

SAMPLE PREPARATION

Stirring with hexane in
ultrasound "Sapphire" 50W
35kHz



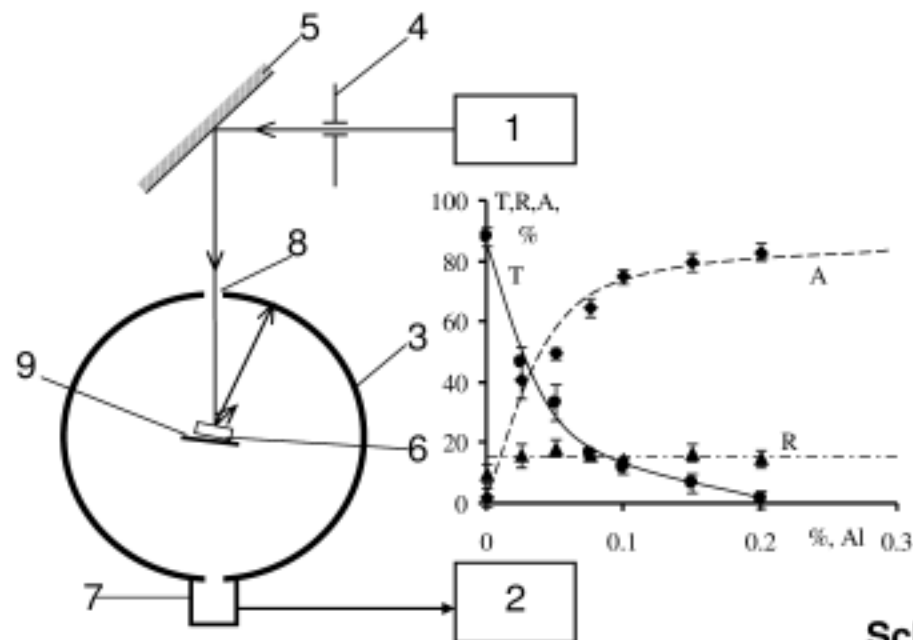
Sample pressing



Sample in a copper frame
with a density of 1.73 ± 0.03
g/cm³, 3 mm in diameter,
1 mm thick.

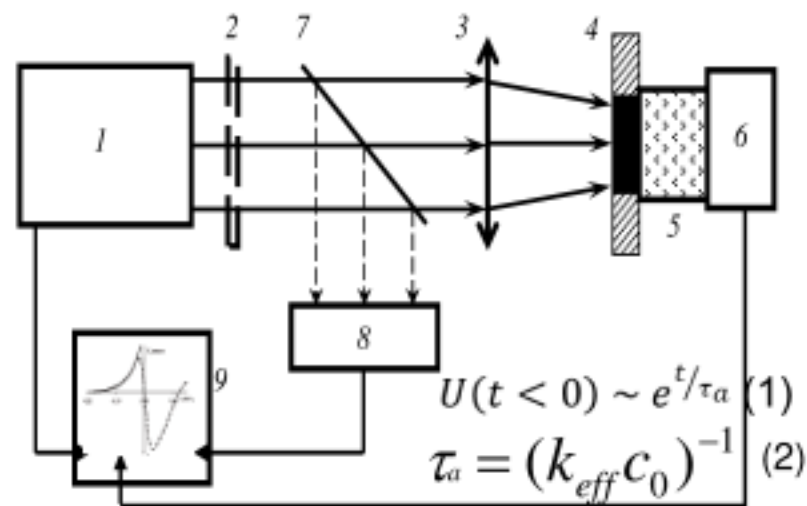


Methods for studying the optical characteristics of explosives with inclusions.



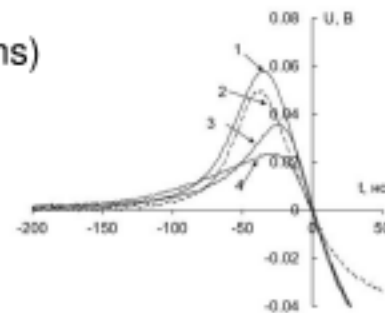
Scheme of the experimental setup for determining the transmission coefficients T and reflection R of samples using the photometric ball method [*]:

- 1 – laser diode (643 nm, 5 mW);
- 2 – millivoltmeter;
- 3 – photometric sphere;
- 4 – diaphragm;
- 5 – swivel mirror;
- 6 – sample;
- 7 – radiation receiver (PIN – photodiode);
- 8 – entrance window;
- 9 – reflector.



Scheme of the experimental setup for determining the extinction index of samples by the optical-acoustic method [].**

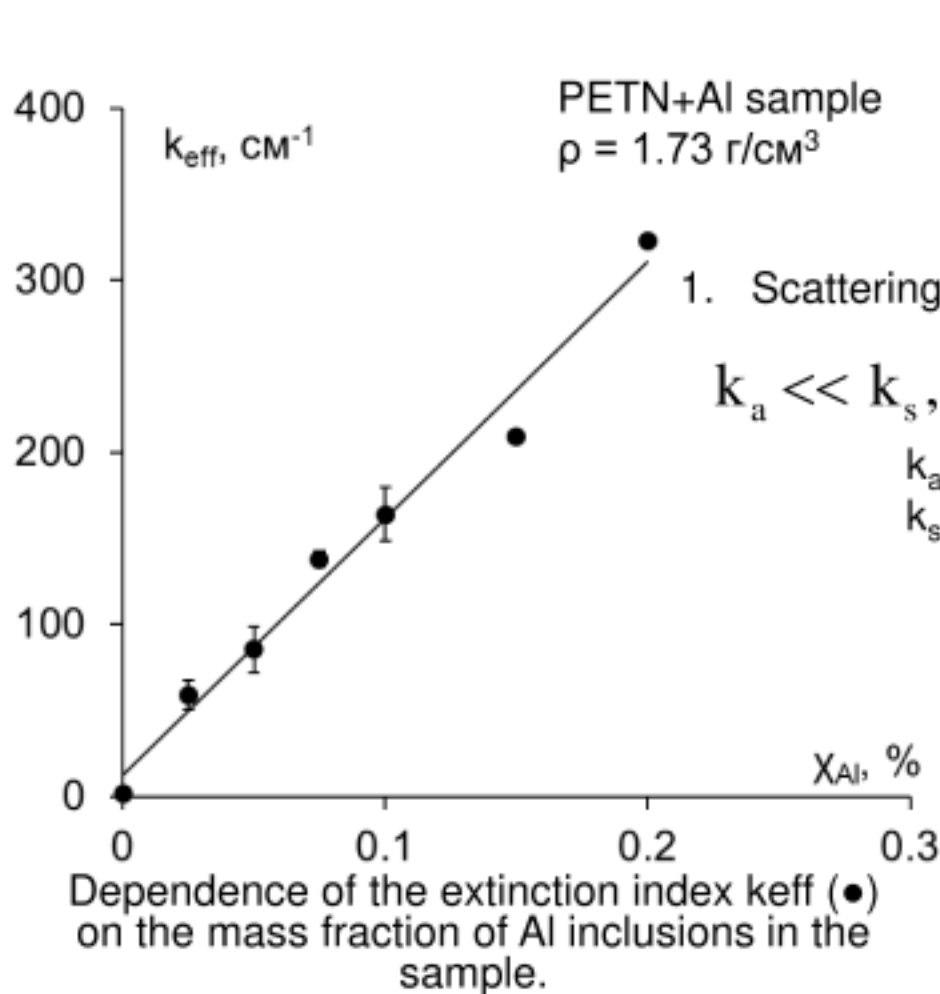
- 1 - pulsed laser (1064, 532 nm, 14ns)
- 2 - neutral light filters,
- 3 - focusing lens,
- 4 - sample in a copper holder,
- 5 - acoustic delay,
- 6 - piezoelectric transducer,
- 7 - beam splitter plate,
- 8 - photodiode,
- 9 - oscilloscope.



*Способ определения оптических свойств наночастиц // Патент России № 2586938. 2016. / Звекон А.А, Нурмухаметов Д.Р., Адуев Б.П. [и др.]

** Гусев, В. Э. Лазерная оптоакустика / В. Э. Гусев, А. А. Карабутов – Москва: Наука, 1991.

Study of the optical characteristics of a heating element with inclusions using the photometric ball method.



Conclusion:
radiation is absorbed directly by inclusions

$$k_{eff} = [3k_a(k_a + k_s')]^{1/2} \quad (3) \quad [*]$$

k_a – absorption rate
 k_s – scattering index

1. Scattering inclusions, weakly absorbing medium :

$$k_a \ll k_s, k_a = \text{const} \quad \rightarrow \quad k_{eff} = [3k_a k_s]^{1/2}$$

$$k_a = \sigma_a n_a$$

$$k_s = \sigma_s n_s$$

$k_{eff}^2 \sim n_s$
 contradicts the experiment

2. Radiation is absorbed by inclusions :

$k_a = \sigma_a n_a, k_s = \sigma_s n_s, n_a = n_s = n$,
 где σ_a is the light absorption cross section of inclusions

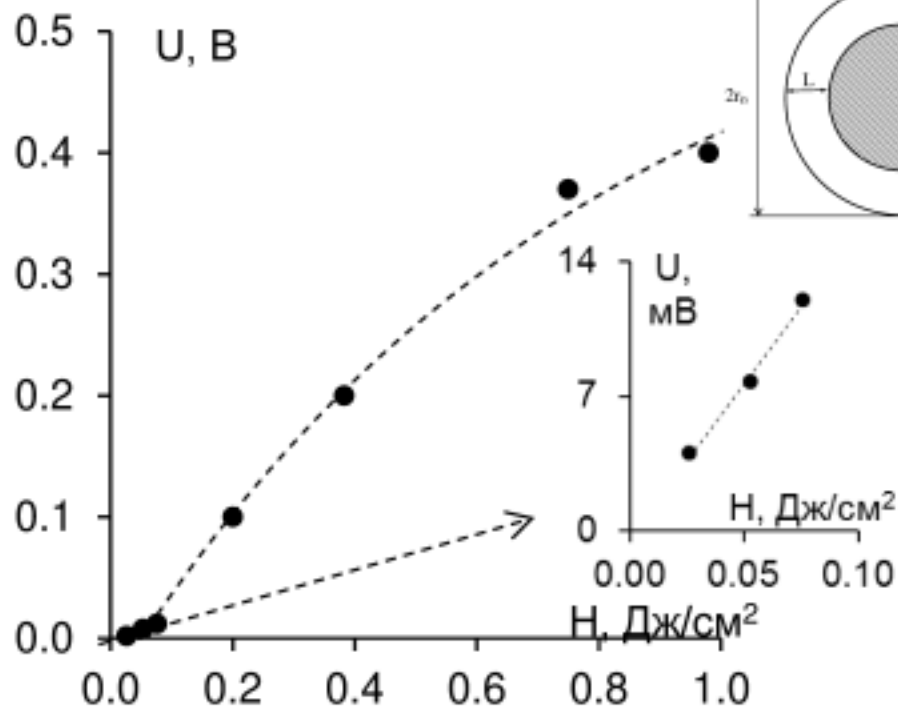
$$k_{eff} = [3\sigma_a n_a (\sigma_a n_a + \sigma_s n_s)]^{1/2} \sim n \quad (4)$$

где σ_a, σ_s – сечения поглощения и рассеяния, соответственно
 n_a, n_s - концентрации включений поглощающих и рассеивающих излучение, соответственно,
 $n_a = n_s = n$

* А.А. Карабутов, И.М. Пеливанов, Н.Б. Подымова, С.Е. Скипетров Измерение оптических характеристик рассеивающих сред лазерным оптико-акустическим методом // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 29, №3. – С. 215-220.

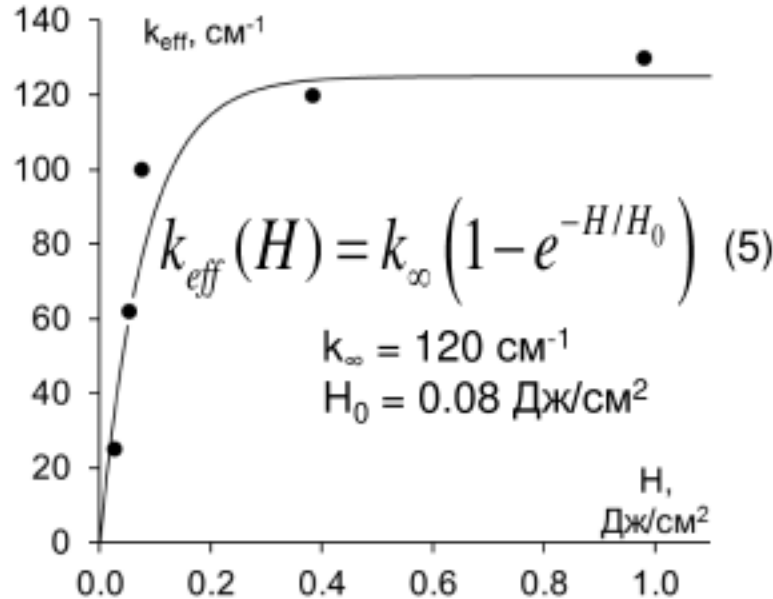
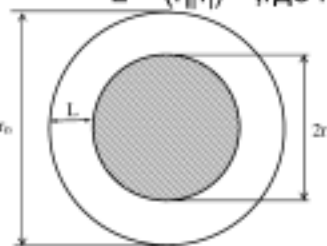
Nonlinear Effects of Absorption of Laser Radiation in a PETN with Inclusions.

$L = (\eta_i \tau_i)^{1/2}$, где η_i – коэффициент температуропроводности матрицы



Dependence of the amplitude of the optical-acoustic signal on the energy density of the laser pulse. Laser radiation 1064 nm. The insets show the dependence in the energy range 0-0.1 J/cm^2 .

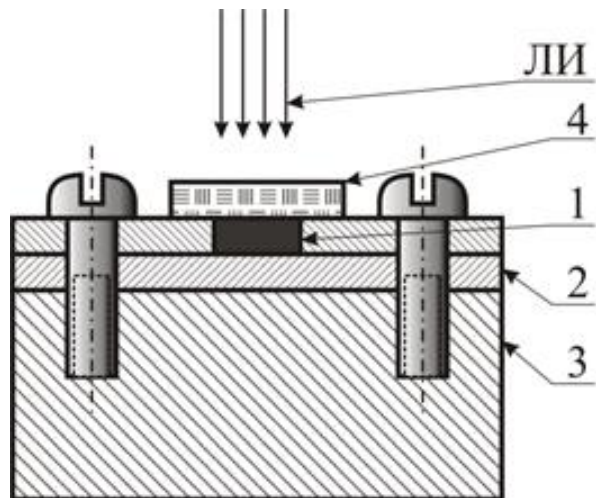
Conclusion: At $H > 0.1 \text{ J}/\text{cm}^2$, the inclusions are heated, the extinction index increases, the heating element in the vicinity of the inclusions is heated to the decomposition temperature, the chemical reaction is initiated, the gas escapes to the surface, and craters are formed.



Dependence of the extinction index k_{eff} on the energy density of laser pulses. Laser radiation 1064 nm.

Образец тЭН+Al
 $\rho = 1.73 \text{ г}/\text{см}^3$
 $d = 1 \text{ мм}$
 $\chi = 0.03 \text{ масс.}\%$

Influence of the Mass Fraction of Inclusions of Ultrafine Metal Particles on the Threshold of Explosive PETN Transformation under Laser Exposure.



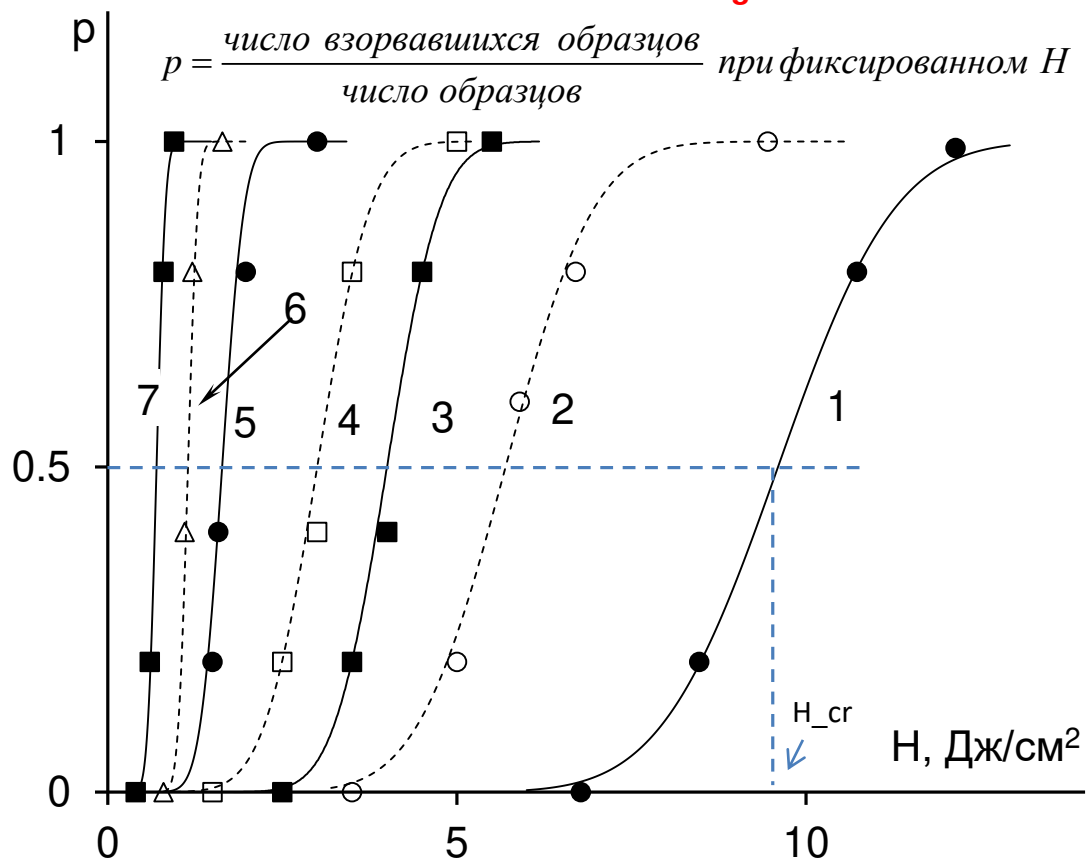
Scheme of the experimental cell.

The condition of **minimal blocking** of gas-dynamic unloading is implemented.

- 1 - copper plate with a pressed sample;
- 2 - witness plate;
- 3 - massive base;
- 4 - glass plate;
- LI - pulse of laser radiation.

1064 нм, 14 нс

Conditions for minimum blocking of gas dynamic unloading

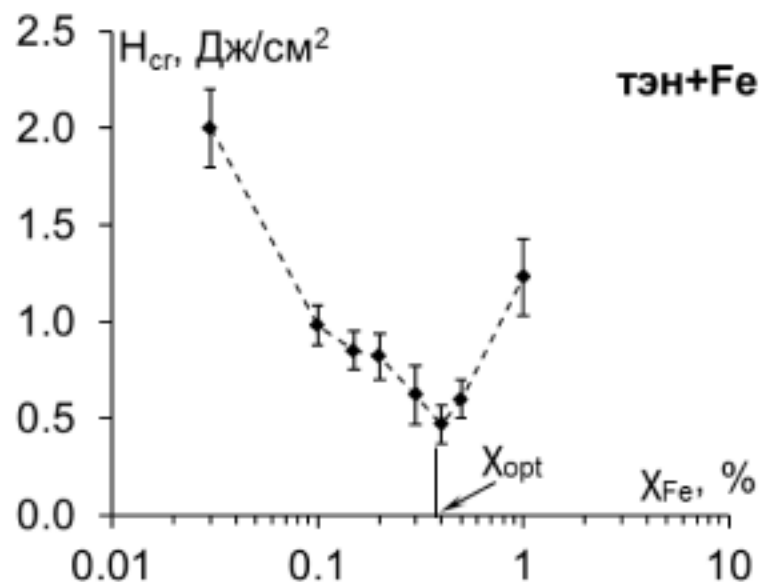
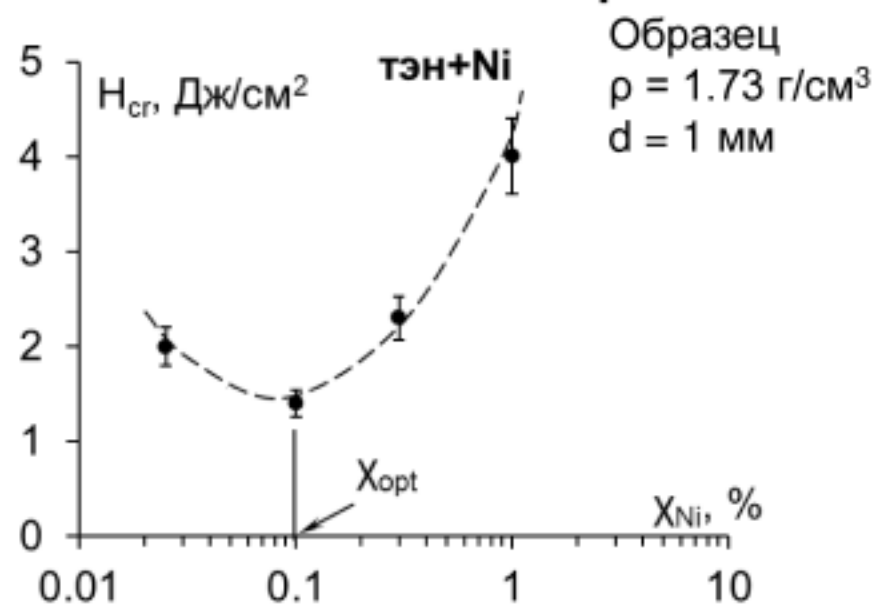
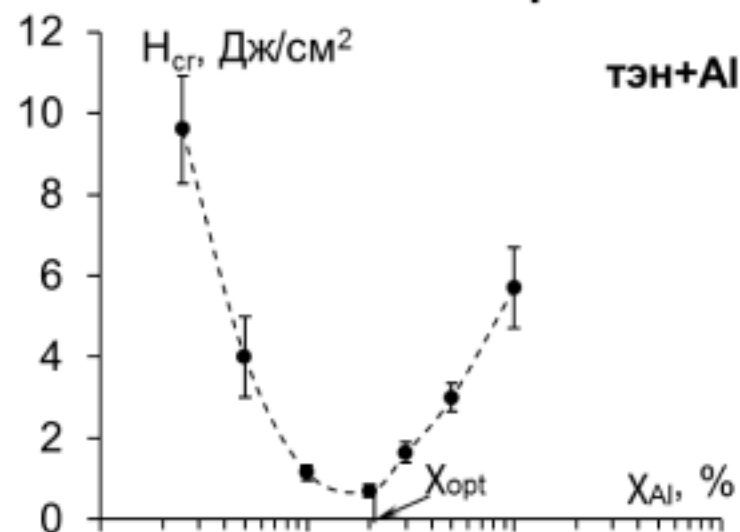


Dependences of the explosion probability of PETN-Al samples on the laser pulse energy density. Initiation by the first harmonic of a neodymium laser.

1 – 0.025, 2 – 1, 3 – 0.05, 4 – 0.5, 5 – 0.3, 6 – 0.1, 7 – 0.2 wt.%.

$$p(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta H} \int_{-\infty}^H e^{-\left(\frac{t-H_{cr}}{\Delta H}\right)^2} dt \quad (7)$$

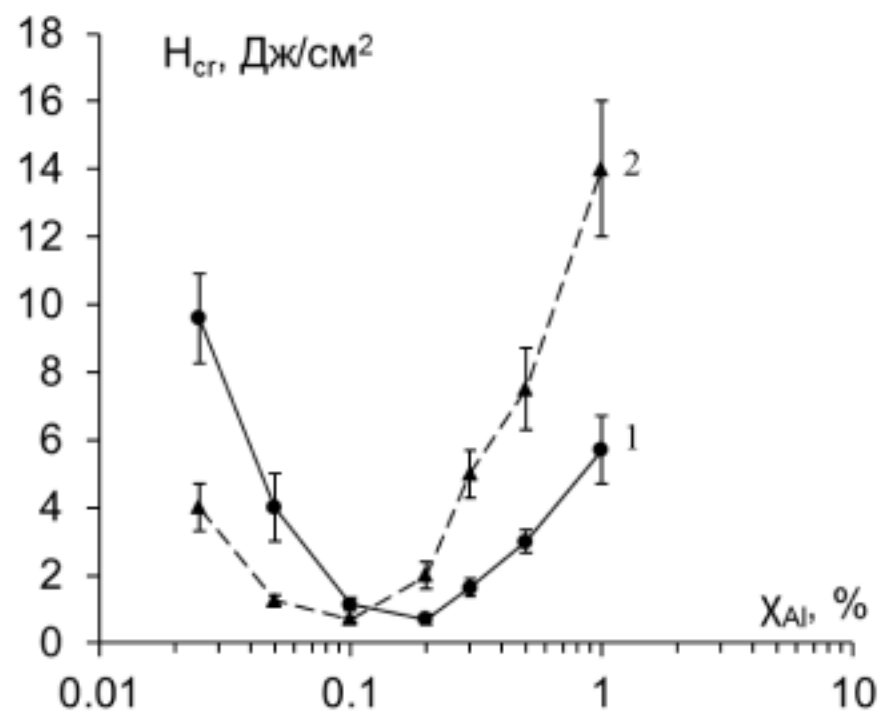
Influence of the Mass Fraction of Inclusions of Ultrafine Metal Particles on the Threshold of Explosive PETN Transformation under Laser Exposure.



Тип включения	Al(120 нм)	Ni(160 нм)	Fe(75 нм)
$H_{cr}, \text{ Дж/см}^2$	0,7	1.4	0.6
$\Delta H_{cr}, \text{ Дж/см}^2$	0.1	0.2	0.1
Mass fraction of inclusions $\chi_{opt}, \%$	0,2	0,1	0.4

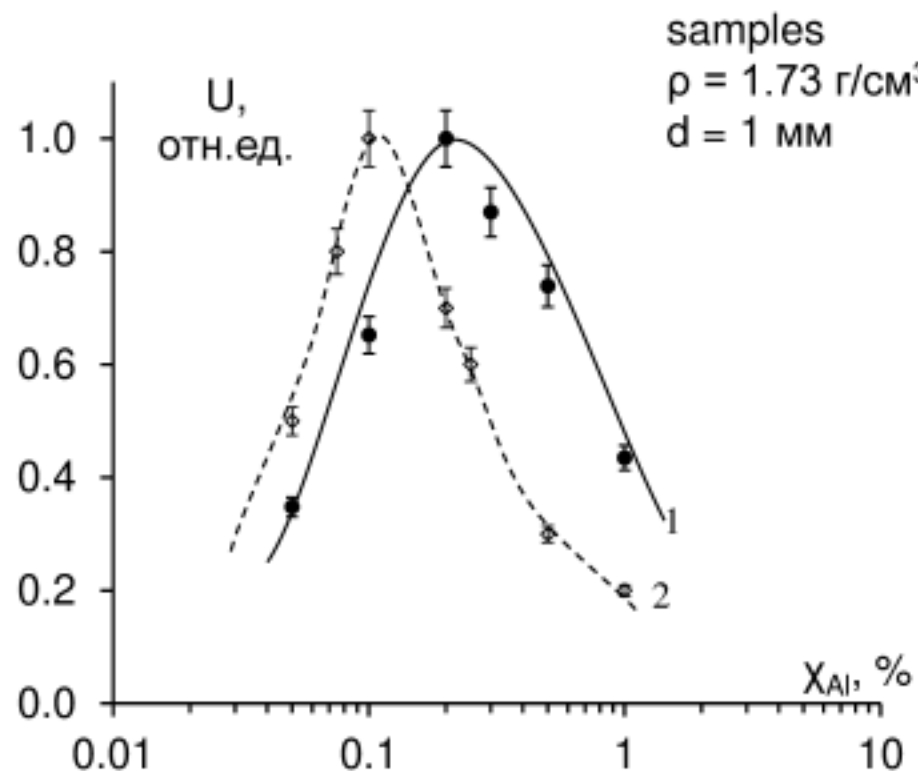
Dependences of the critical energy density of explosion initiation H_{cr} on the mass fraction of inclusions in the samples.

Influence of the wavelength of laser radiation on the threshold of explosive transformation of PETN with inclusions of ultrafine particles under laser exposure.



Dependence of the critical energy density of explosion initiation H_{cr} on the mass fraction of Al inclusions in the samples.

1 – 1064 нм; 2 – 532 нм



Dependence of the amplitude of the optical-acoustic signal of the PETN-Al samples on the mass fraction of Al inclusions in the samples.

1 – 1064 нм; 2 – 532 нм.

samples
 $\rho = 1.73 \text{ г/см}^3$
 $d = 1 \text{ мм}$

Threshold and dynamic characteristics of explosive decomposition of PETN-aluminum samples.

Таблица 3.

ρ , г/см ³	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7
H_{cr}^{min} , Дж/см ²	3.3 ± 0.3	3.2 ± 0.3	2.1 ± 0.3	1.0 ± 0.2	0.7 ± 0.1
χ_{opt} , масс %	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
V_i , км/с	4.8 ± 0.1	4.5 ± 0.1	3.8 ± 0.1	3.2 ± 01	2.4 ± 0.1
P_{max} , отн.ед.	46	40	30	17	8
t_{max} , мкс	4,3	4.6	5.3	5.7	6.1

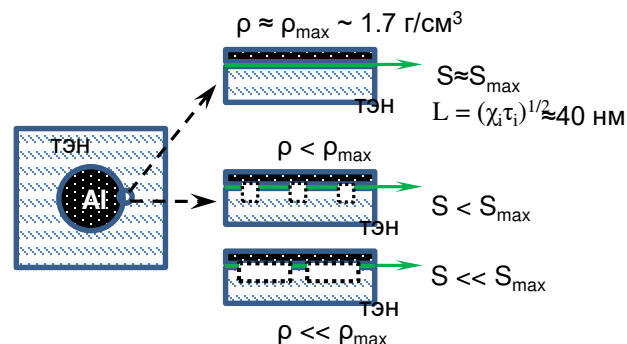
ρ – sample density,

H_{cr}^{min} – minimum threshold for explosive decomposition of samples at the optimum mass fraction χ_{opt}

V – air shock wave speed,

P_{max} – maximum pressure value (in rel. units) SW in air,

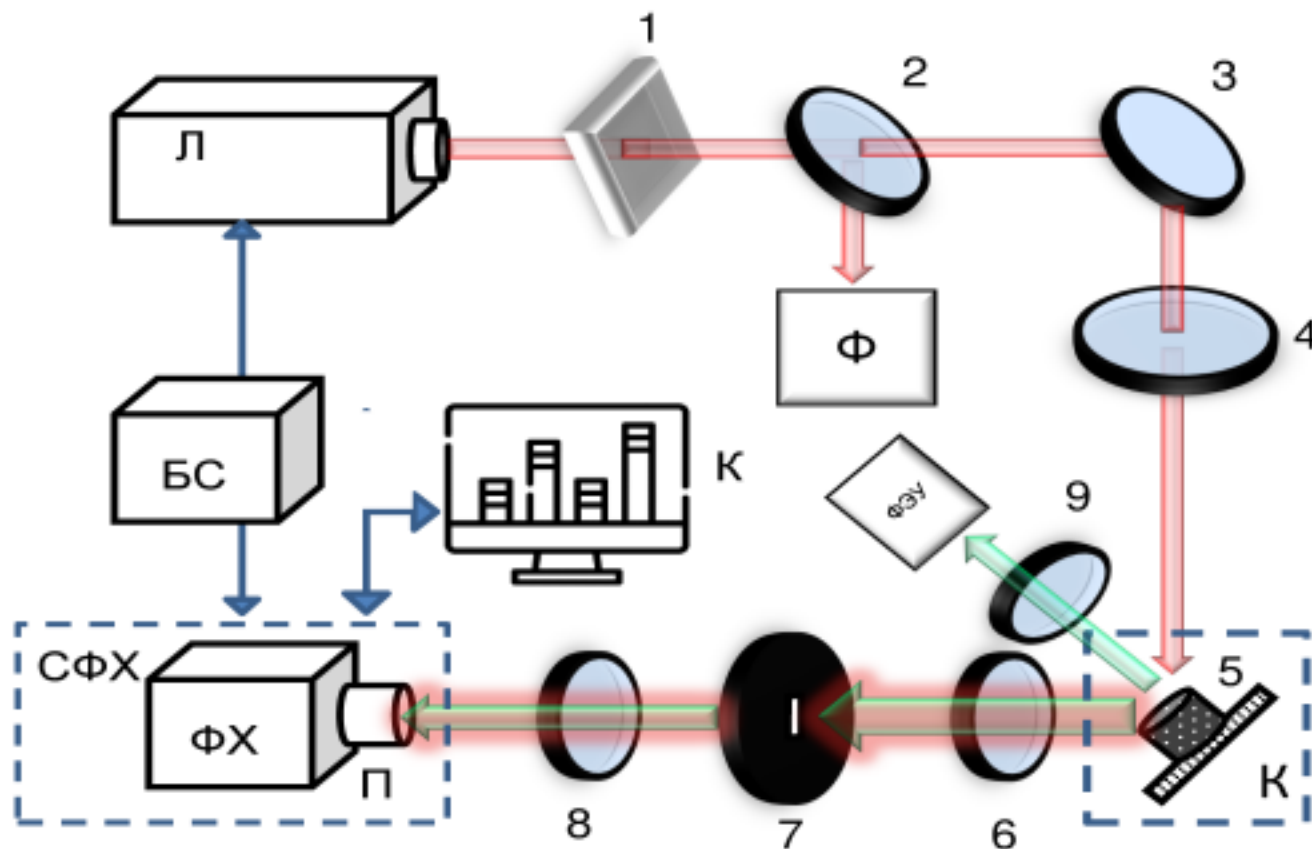
t_{max} – reaching time P_{max}



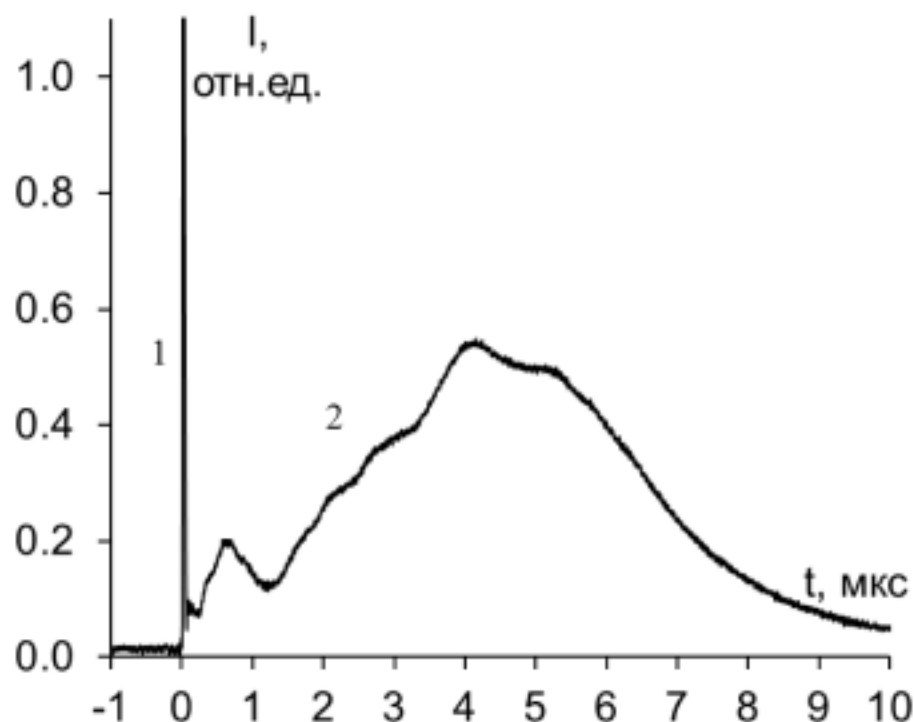
Апин, А. Я. О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ / А. Я. Апин // Доклады АН СССР. – 1945. – Т. 50. – С. 285–288.

Орленко, Л. П. Физика взрыва / Л. П. Орленко – Москва: ФИЗМАТЛИТ, Т1, 2004.

Spectral-Kinetic Characteristics Glow of Explosives with Inclusions of Ultrafine Particles under laser exposure



Functional scheme of the experimental setup. 1 - neutral light filters, 2 - beam splitter, 3 - rotary mirror, 4 - lens ($F = 25$ cm), 5 - experimental assembly with the sample, 6, 8, 9 - lenses ($F = 10$ cm), 7 - spectral time slit, L - pulsed Nd:YAG laser, F - photodiode, FKh - photochronograph, P - polychromator, SFC - VZGLYAD-2A spectrophotochronograph, BS - synchronization unit, C - computer, PMT - photomultiplier multiplier.



Образец
 $\rho = 1.73 \text{ г/см}^3$
 $d = 1 \text{ мм}$

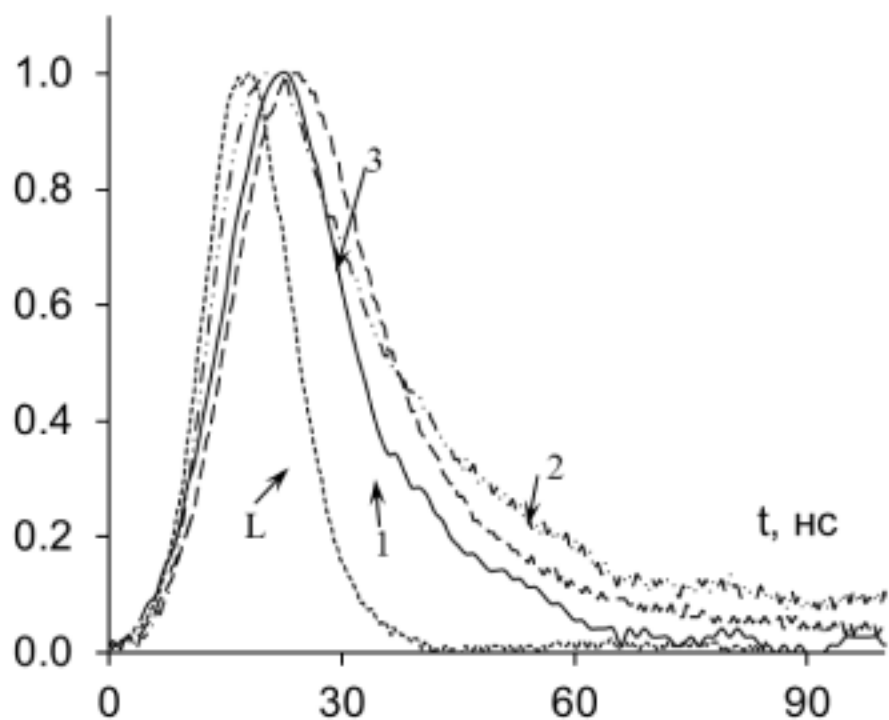
Рис. 29. Full kinetics of the glow integrated over the spectrum, arising from the explosion of PETN + Al samples.

1 – glow peak that occurs at the moment of exposure to a laser pulse,

2 - glow peaks occurring at a time of 0.5-10 μs .

The energy density of laser radiation is 2.5 J/cm².

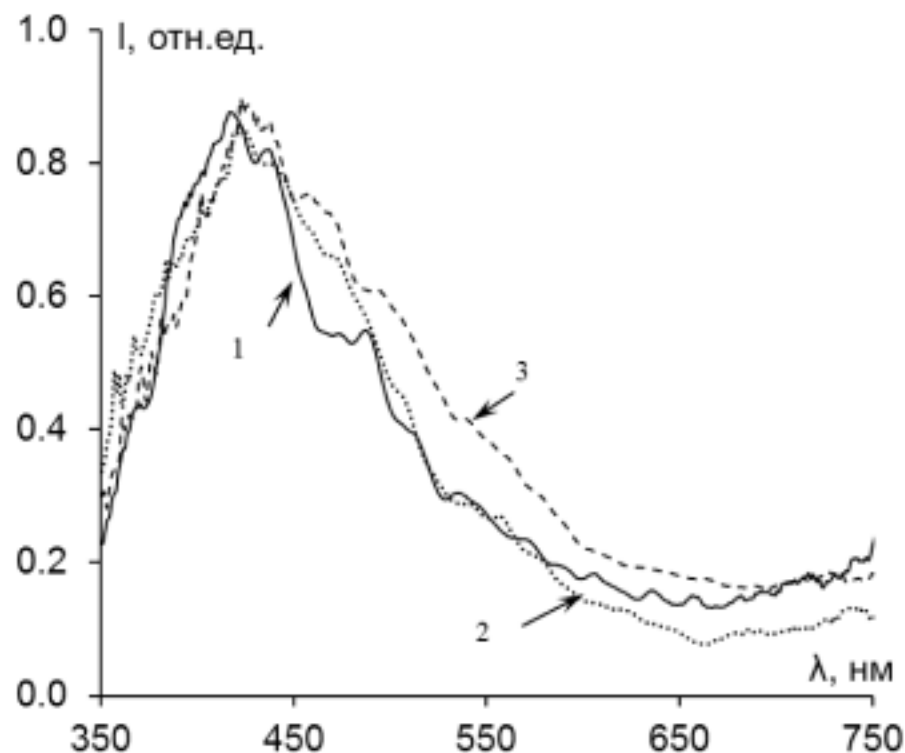
Experimental measurement of the spectral and kinetic characteristics of the glow of a PETN with inclusions of ultrafine particles under laser exposure (glow during laser exposure)



Glow kinetics at the moment of exposure to a laser pulse.

1 – PETN-Al, 2 – PETN-Ni, 3 – PETN-Fe,
L is the laser pulse.

Laser radiation energy density 2.5 J/cm²

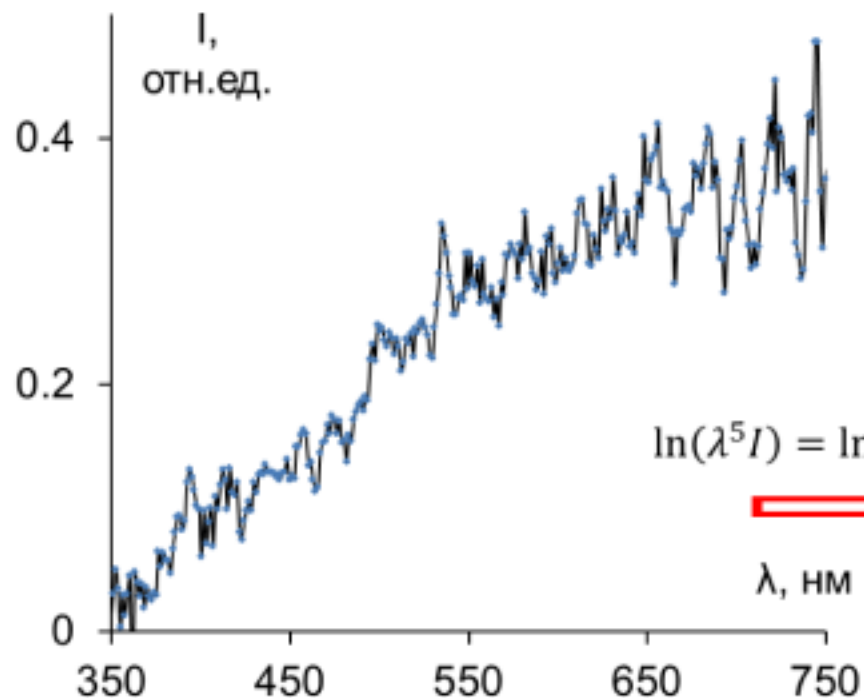


Emission spectra at the moment of exposure to a laser pulse.

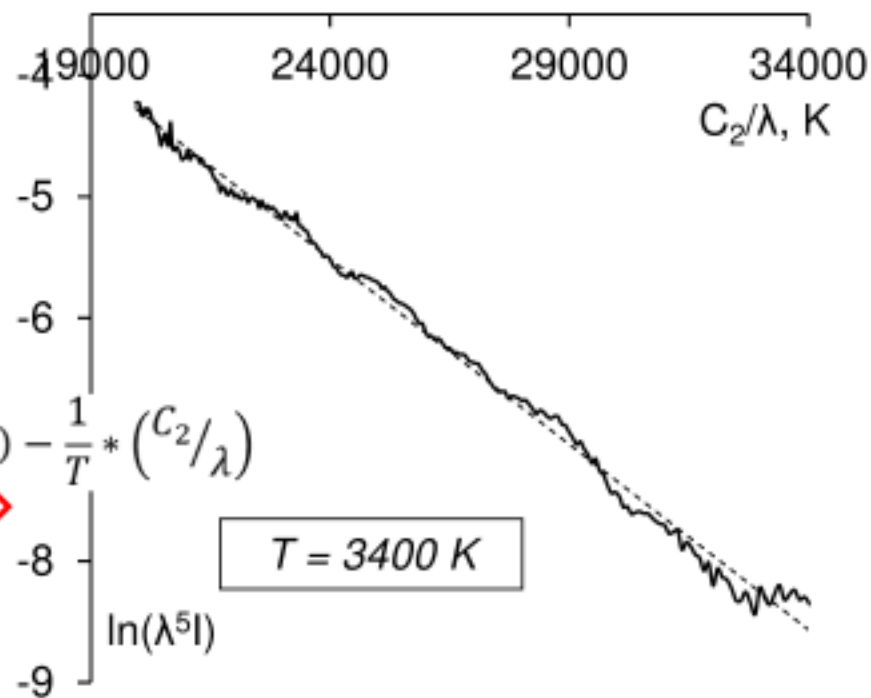
1 – PETN-Al, 2 – PETN-Ni, 3 – PETN-Fe.
Laser radiation energy density 2.5 J/cm²

- Б. П. Адуев, В. А. Ананьев, А. П. Никитин, А. А. Звеков, А. В. Каленский // Химическая физика. – 2016. – Т. 35 – № 11. – С. 26–36.
- А. В. Каленский, М. В. Ананьева, А. А. Звеков, А. П. Никитин // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85 – № 3. – С. 119–123.

Experimental measurement of the spectral and kinetic characteristics of the glow of a PETN with inclusions of ultrafine particles, resulting from the development of a chemical reaction after exposure to a laser radiation pulse (glow of explosion products)



PETN-Al glow spectrum at 4 μ s.



Emission spectra in Wien coordinates. Solid curve - experiment, dotted line - linear regression.

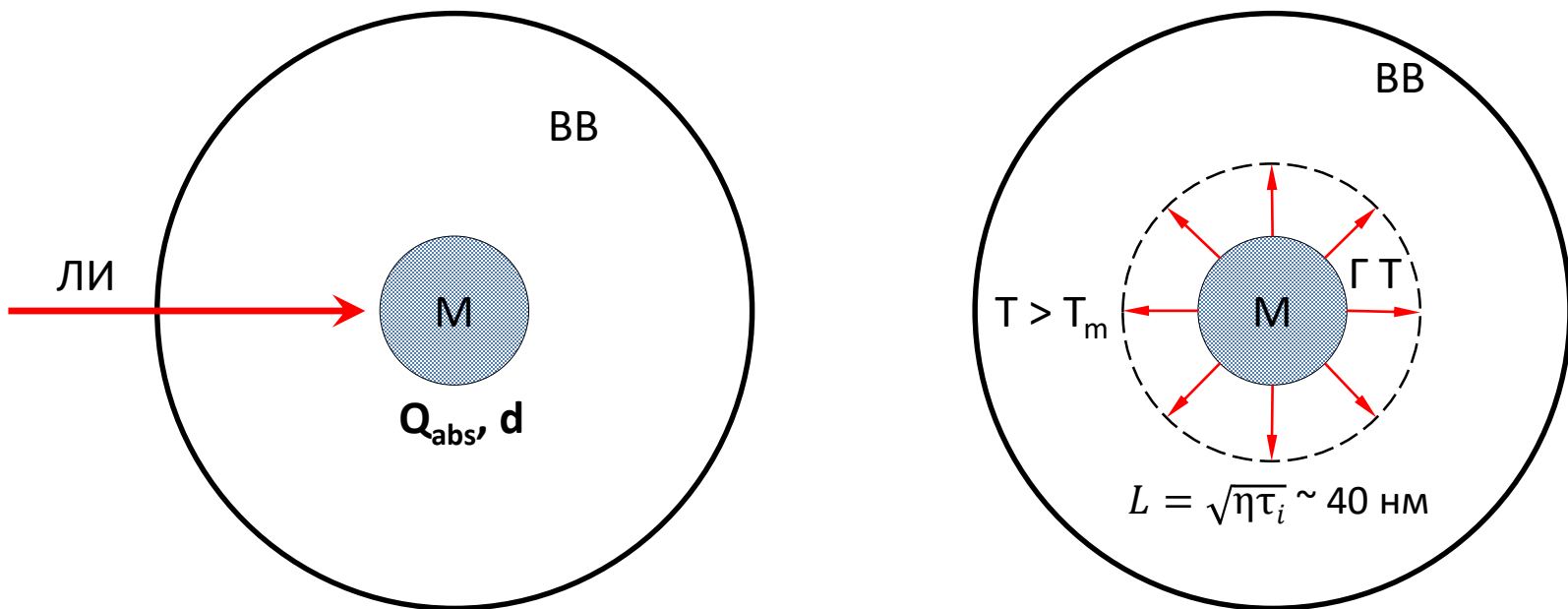
$$I = \epsilon C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2/\lambda T) - 1] \quad C_1 = 37418 \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^4/\text{см}^2; \quad C_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

при $C_2/\lambda T \gg 1$, то

$$\ln(\lambda^5 I) - \ln(\epsilon C_1) = - C_2/(\lambda T)$$

**Model of Laser Initiation of Explosive
Decomposition of Low-Absorbing Radiation
Explosives with Inclusions of Ultrafine Metal
Particles**

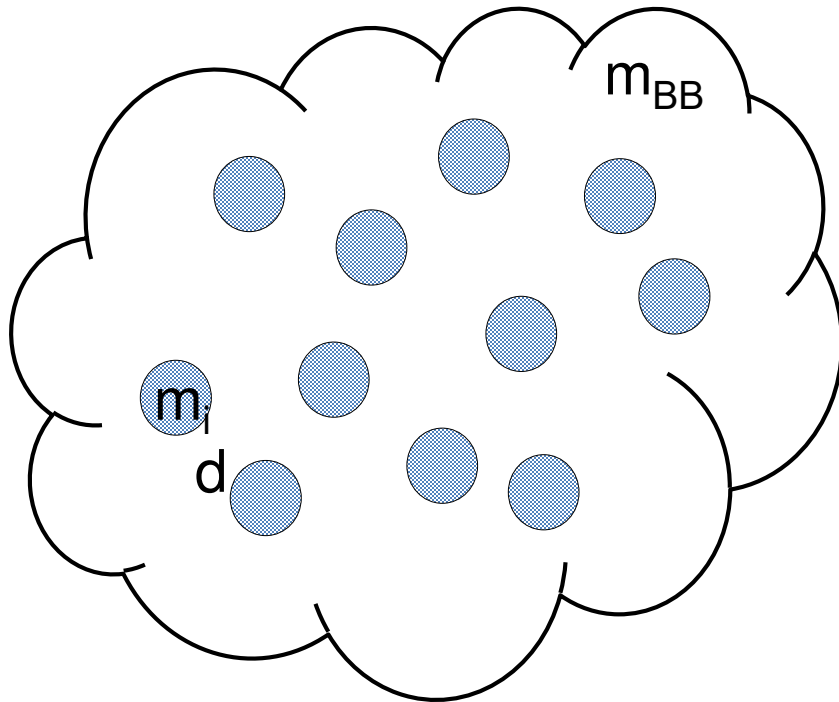
A). Absorption of laser radiation by metal particles, heating of particles and adjacent layers of explosives to a temperature above the melting point of explosives. The particle and its heated environment of explosives are a "hot spot".



B). For each type of inclusions in the explosive sample, there is

- optimal mass fraction χ_{opt}
- optimal size d_{opt} ,

at which the laser explosion initiation threshold H_{cr} is minimal.

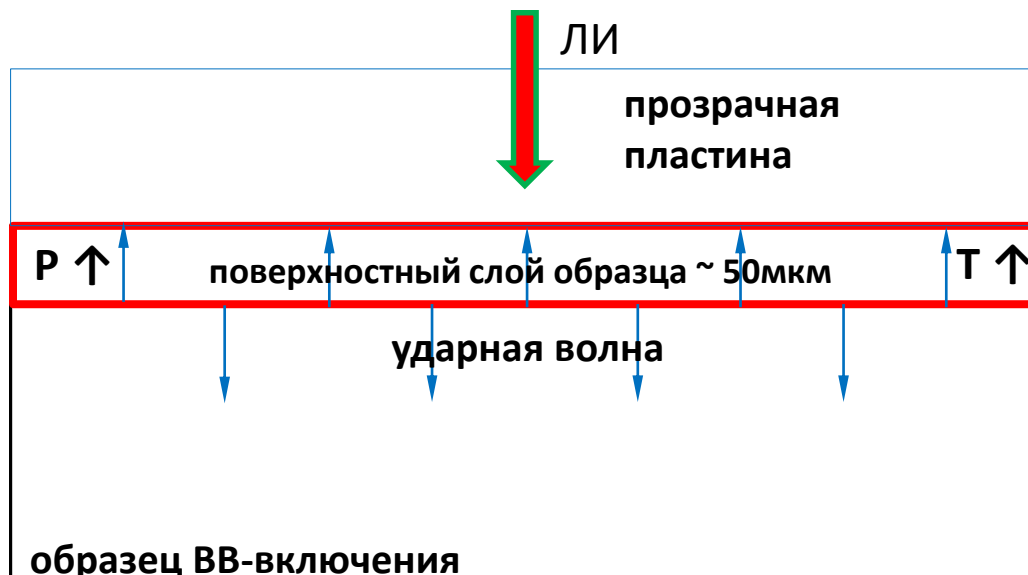


$$\chi_{opt} = \frac{\sum m_i}{m_{BB}}$$

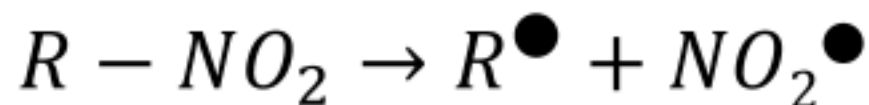
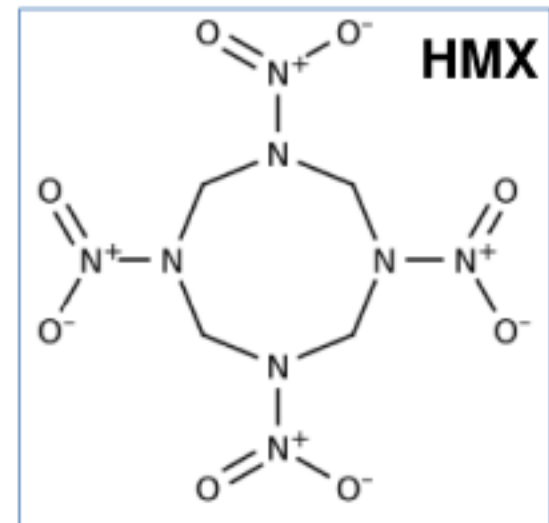
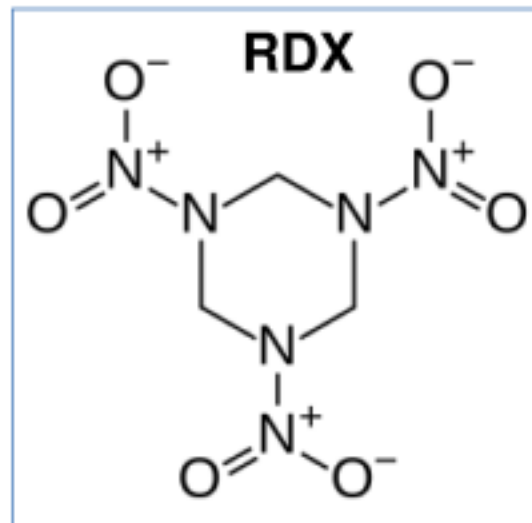
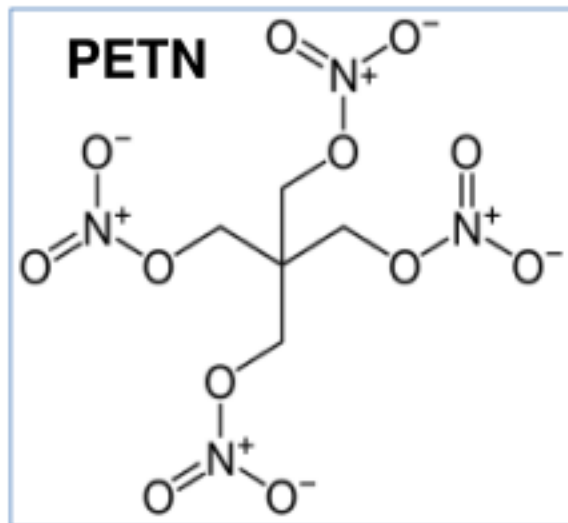
$$H_{cr} \left(\begin{array}{l} \chi = \chi_{opt} \\ d = d_{opt} \end{array} \right) = H_{cr}^{min}$$

C). A necessary condition for the explosion is blocking the gas-dynamic unloading of the sample. Varying the conditions of gas-dynamic unloading of the samples makes it possible to change the minimum threshold in the heating element by a factor of ~ 10 .

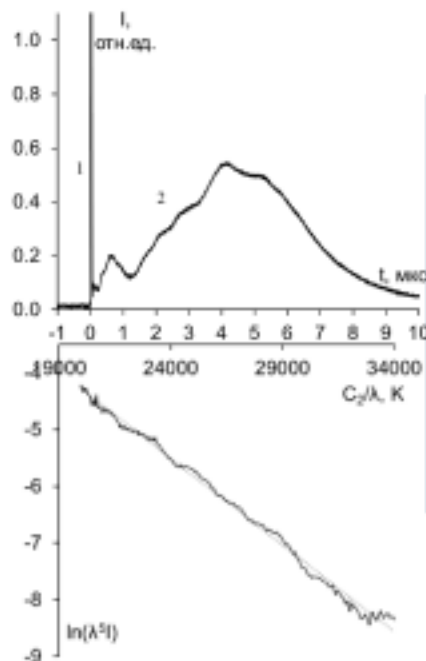
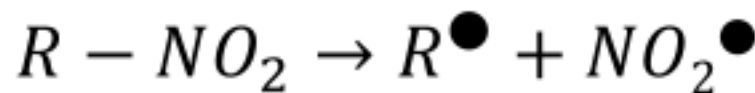
The absorption of laser radiation energy at the optimal mass fraction of inclusions occurs in the surface layer of the sample with depth. As a result of the development of a chemical reaction in "hot spots", an increase in temperature and pressure occurs in the irradiated layer, which leads to the appearance of a shock wave and its propagation into the non-irradiated part of the sample. The development of explosive decomposition in the non-irradiated layer of the sample occurs according to the shock-wave mechanism.



D). when the energy density exceeds the threshold value, the explosive molecule (PETN, hexogen) dissociates into an excited $\text{NO}_2\bullet$ radical and a residual $\text{R}\bullet$ radical.



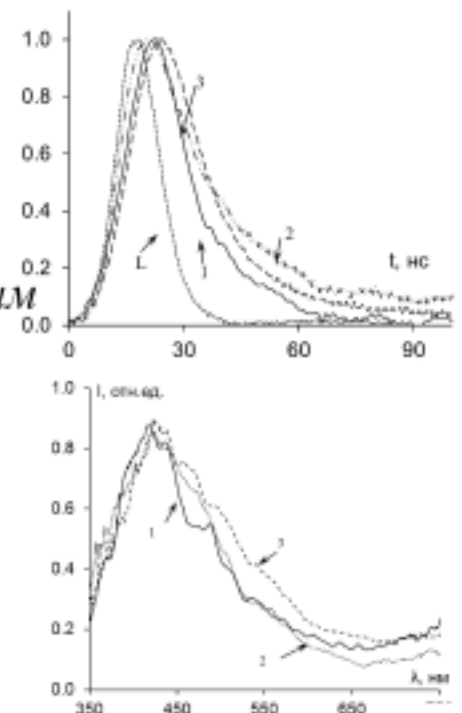
E). The $\text{NO}_2\cdot$ radical fluoresces for a time of ~ 60 ns. An exothermic chemical reaction occurs in the residual radical $\text{R}\cdot$, leading to the transformation of the sample into gaseous products and an explosion. The process takes place in the microsecond time interval and is accompanied by a thermal glow with a temperature of $T \sim 3500$ K.



Exothermic Reaction
Gaseous products
Explosion
 $t \sim 1 - 10$ мкс
 $T \sim 3500$ K

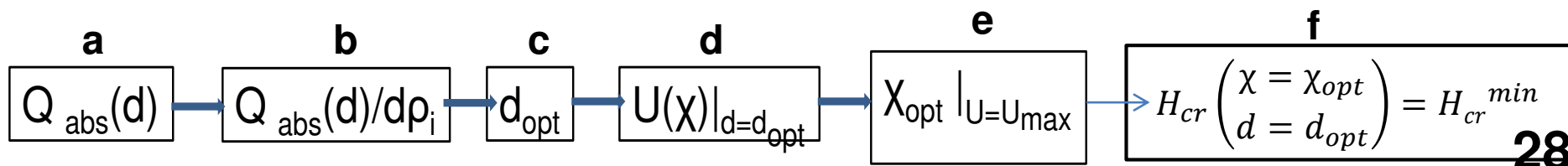
Fluorescence

$\lambda \sim 400 - 600$ нм
 $t \sim 60$ нс



A scientifically substantiated algorithm for obtaining materials based low-absorbing radiation explosives with inclusions of ultrafine metal particles with minimal initiation energy densities H_{cr} :

- a. Calculate the absorption efficiency coefficient $Q_{abs}(d)$ depending on the size of inclusions d of a certain metal in the matrix at a given density of a certain blasting explosive (PETN, RDX, HMX, etc.) at the required laser wavelength.
- b. Calculate the dependence $Q_{abs}(d)/d$ and determine the particle size d_{opt} at the maximum of the obtained dependence.
- c. Using particles of the corresponding metal with sizes d_{opt} , prepare samples of explosives with different mass fractions of inclusions χ .
- d. Conduct optical-acoustic measurements of the dependence of the amplitude (U) of the acoustic signal on the mass fraction of inclusions (χ) in the sample.
- e. From the obtained dependence $U(\chi)$ determine the optimal mass fraction of inclusions χ_{opt} corresponding to the maximum of the dependence $U(\chi)$.
- f. Use samples of explosives with metal inclusions with optimal sizes d_{opt} and optimal mass fraction χ_{opt} in explosive experiments, which will give the minimum threshold for laser initiation of an explosion H_{cr} at the selected density of explosives.



Model validation using hexogen-based composite materials (RDX) and inclusions of ultrafine metal particles under the influence of laser pulses.

- RDX-Al and PETN-Al composites' glow spectral kinetics at the explosion initiated with laser pulse / *B. P. Aduев, D. R. Nurmukhametov, I. Y. Liskov, A. A. Zvekov* // *Combustion and Flame*. – 2021. – Т. 223. – С. 376–381.
- Laser pulse initiation of RDX-Al and PETN-Al composites explosion / *B. P. Aduев, D. R. Nurmukhametov, I. Y. Liskov, A. V. Tupitsyn, G. M. Belokurov* // *Combustion and Flame*. – 2020. – Т. 216. – С. 468–471.
- Исследование оптических свойств композитов гексоген--алюминий / *Б. П. Адуев, Г. М. Белокуров, Д. Р. Нурмухаметов, И. Ю. Лисков, Н. В. Нелюбина, А. А. Звеков, А. В. Каленский* // *Журнал технической физики*. – 2018. – Т. 125 – № 11. – С. 600.
- Поглощение импульсного лазерного излучения композитами на основе гексогена и наночастиц алюминия / *Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, А. А. Звеков, А. В. Каленский, И. Ю. Лисков* // *Квантовая электроника*. – 2019. – Т. 49 – № 2. – С. 141–144.
- Оптоакустическое исследование и моделирование оптических свойств композитов циклотриметилентринитрамин-ультрадисперсные частицы никеля / *Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, А. А. Звеков, Н. В. Нелюбина, С. А. Созинов, А. В. Каленский, М. В. Ананьева, Е. В. Галкина* // *Оптика и спектроскопия*. – 2020. – Т. 128 – № 5. – С. 659.

Comparison of the experimental results and the observed regularities on laser initiation of composites based on PETN and RDX with inclusions of Al, Ni, Fe particles shows that the proposed model well describes the explosive decomposition of composites based on low-absorbing radiation explosives with inclusions of ultrafine metal particles

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Спасибо за внимание!

Влияние массовой доли включений ультрадисперсных металлических частиц на порог взрывчатого превращения тэна при лазерном воздействии.

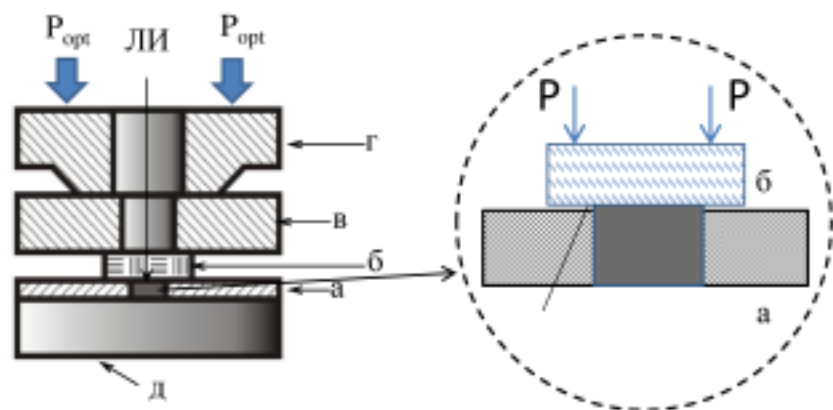


Рис. 11. Схема экспериментальной ячейки для условия **полного** блокирования газодинамической разгрузки.

Условия полного блокирования газодинамической разгрузки

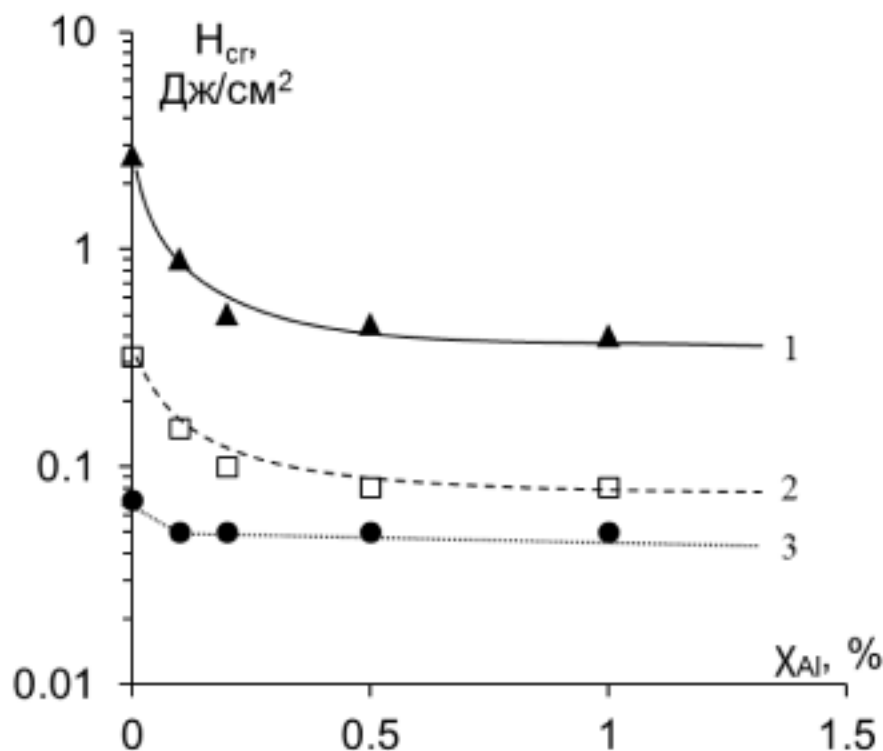


Рис. 12. Зависимости H_{cr} для тэна от массовой доли включений Al в образце при различных внешних статических давлениях (схема рис. 11):
1 – 17 МПа, 2 – 120 МПа, 3 – 288 МПа.

Амплитуда акустического сигнала при воздействии лазерного излучения в зависимости от массовой доли включений в различных условиях газодинамической разгрузки образцов.

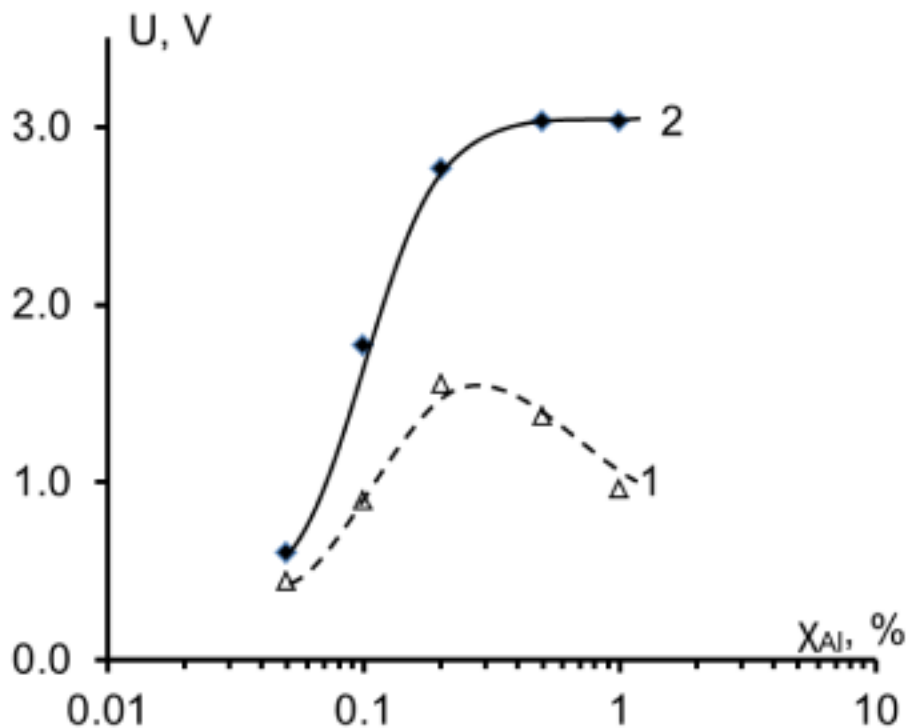


Рис. 13. Зависимость амплитуды сигнала с пьезопреобразователя от массовой доли включений Al в образце.

1 – при накрытой облучаемой поверхности образца стеклянной пластиной без приложения нагрузки;

2 - при накрытой облучаемой поверхности образца стеклянной пластиной с приложенной к ней нагрузкой $P = 17$ МПа.

Вывод: Характер зависимости N_{cr} существенно зависит как от χ , так и условий газодинамической разгрузки которая обуславливает характер изменения давления в слое поглощения энергии.

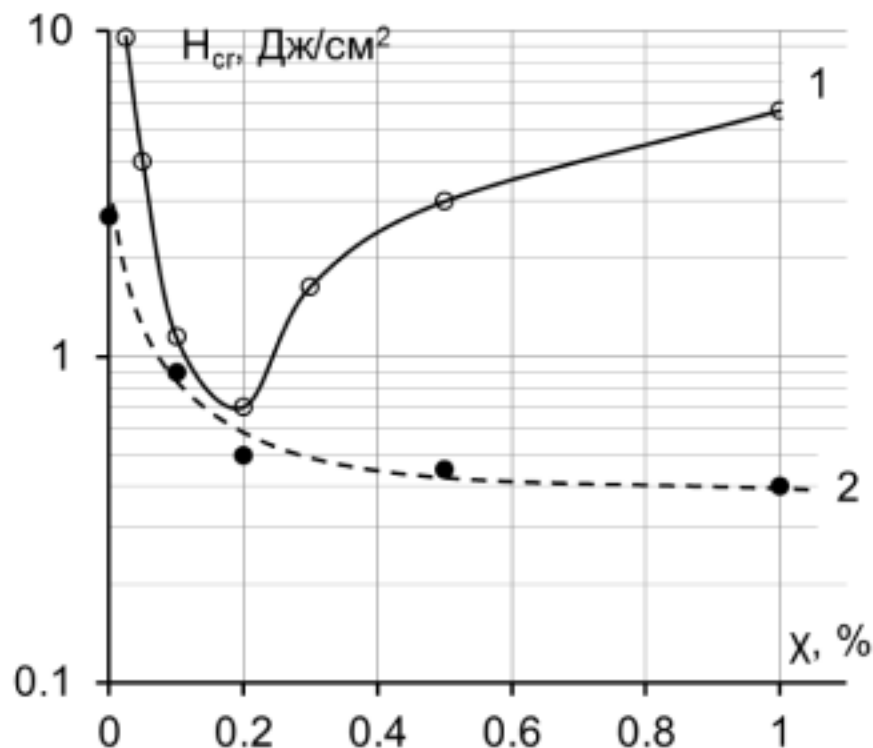


Рис. 14. Пороги взрывчатого разложения, полученные в разных условиях блокирования газодинамической разгрузки от массовой доли включений Al:

1 – без дополнительной нагрузки (рис. 8, 10)

2 – давление прижатия на образец 17 МПа (рис. 11, 12);

Для композитов RDX-Ni исследованы оптико-акустические характеристики в зависимости от размера включений Ni

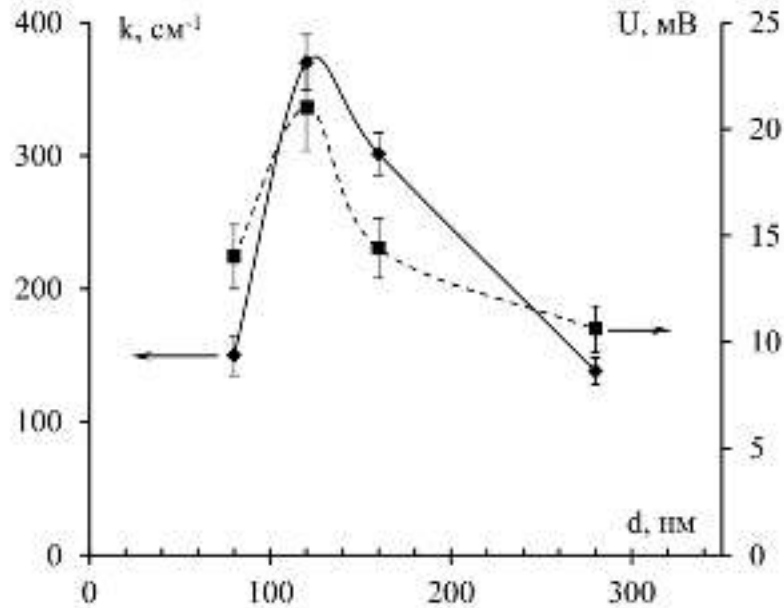


Рис. 37. Зависимость показателя экстинкции $k_{эфф}$ и амплитуды оптико-акустического сигнала U от размеров включений Ni в композитах RDX-Ni.

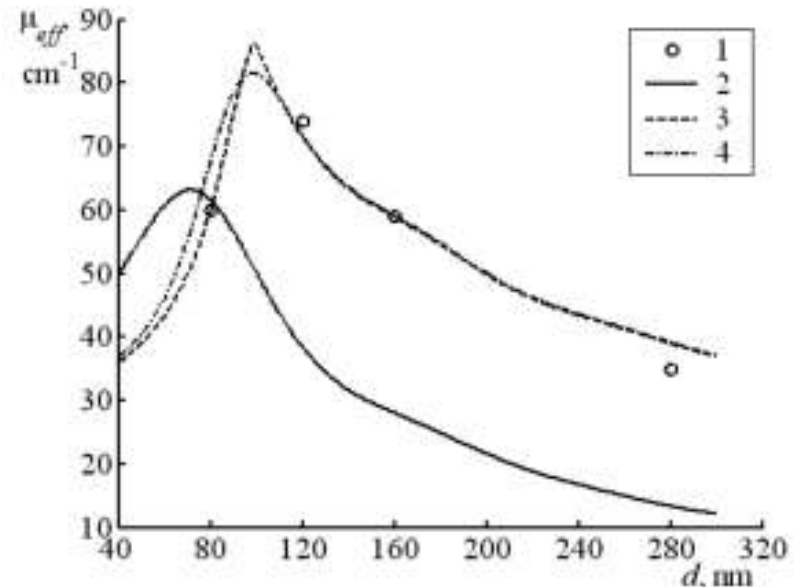


Рис. 38. Влияние диаметра наночастиц никеля на показатель поглощения композитов RDX-Ni. 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет при пренебрежении порами, 3 – расчет с учетом пор диаметром 99 нм и концентрацией $1.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, 4 – расчет при тех же значениях средней концентрации и диаметра пор с дисперсией 20 нм.

Таким образом, предлагаемая модель применима не только к сплошным, но и пористым образцам.

Экспериментально определены значения порогов взрывчатого разложения композитов на основе RDX и включений металлов ультрадисперсных размеров при лазерном воздействии и установлены их связи с оптическими и опто-акустическими характеристики

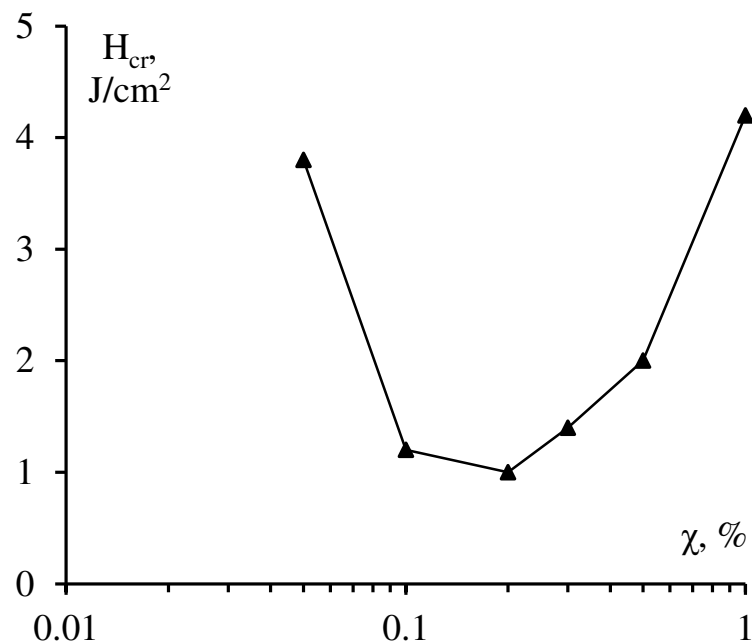


Рис. 39. Зависимости критической энергии инициирования взрыва (H_{cr}) композит RDX-Al от массовой доли включений алюминия (χ) в образце.

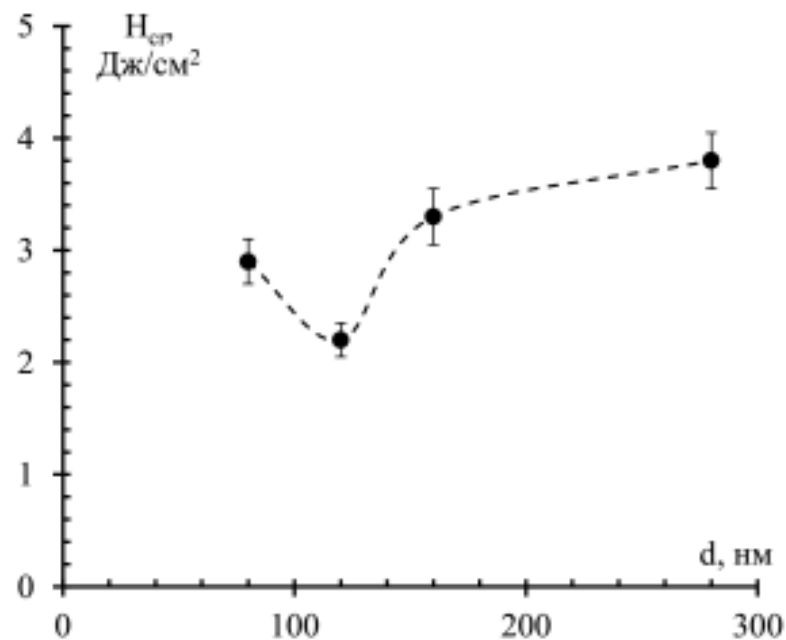


Рис. 40. Зависимость порогов взрывчатого разложения H_{cr} при лазерном инициировании композитов RDX-Ni от размера включений Ni в образце.

Для композитов на основе RDX наблюдаются те же закономерности, что и для композитов на основе тэна, которые описываются в рамках предложенной модели

Влияние длины волны лазерного излучения на порог взрывчатого превращения тэна с включениями ультрадисперсных частиц при лазерном воздействии.

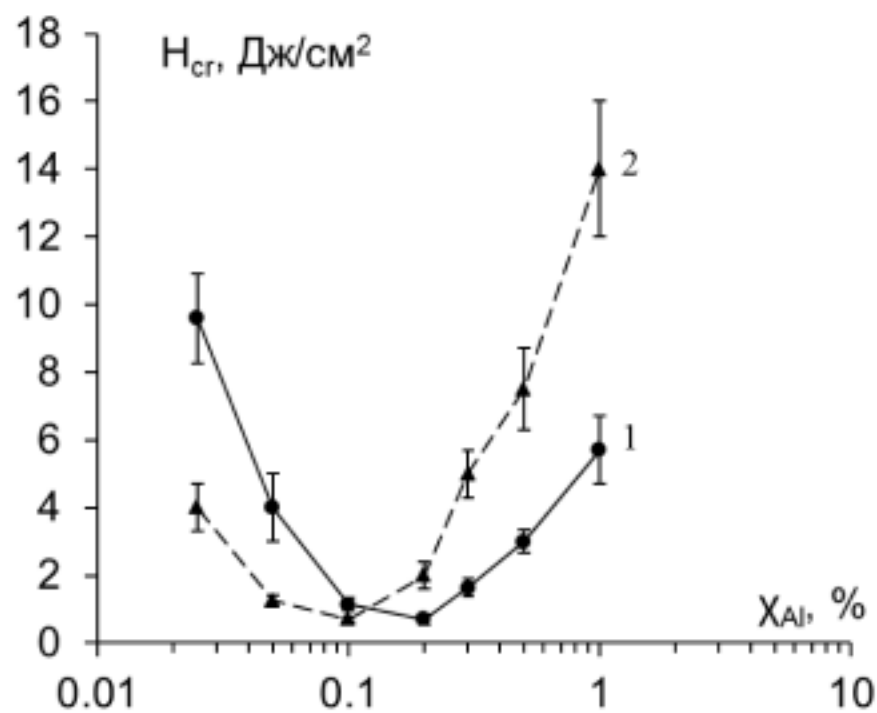


Рис. 19. Зависимость критической плотности энергии инициирования взрыва H_{cr} от массовой доли включений Al в образцах.

1 – 1064 нм; 2 – 532 нм

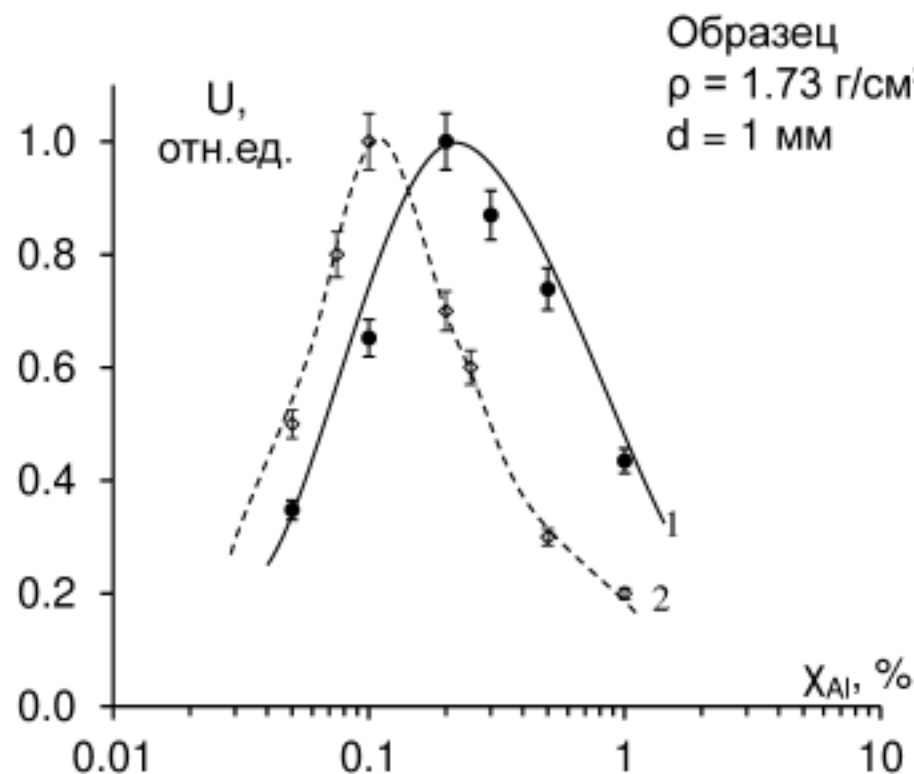


Рис. 20. Зависимость амплитуды оптико-акустического сигнала образцов тэн-Al от массовой доли включений Al в образцах.

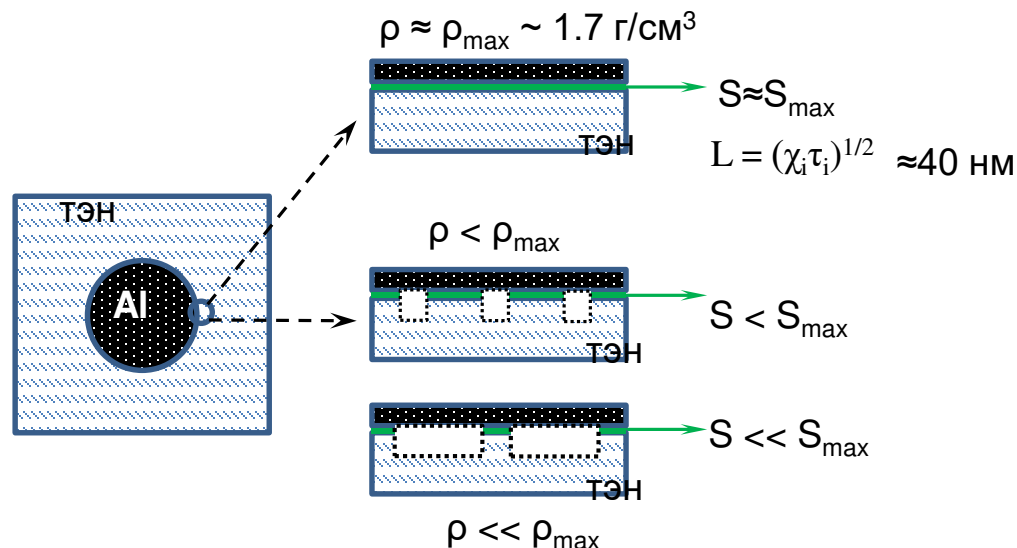
1 – 1064 нм; 2 – 532 нм.

Пороговые и динамические характеристики взрывчатого разложения образцов тэн-алюминий.

Таблица 3.

ρ , г/см ³	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7
H_{cr}^{min} , Дж/см ²	3.3 ± 0.3	3.2 ± 0.3	2.1 ± 0.3	1.0 ± 0.2	0.7 ± 0.1
χ_{opt} , масс %	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
V_i , км/с	4.8 ± 0.1	4.5 ± 0.1	3.8 ± 0.1	3.2 ± 0.1	2.4 ± 0.1
P_{max} , отн.ед.	46	40	30	17	8
t_{max} , мкс	4,3	4.6	5.3	5.7	6.1

ρ – плотность образца,
 H_{cr}^{min} – минимальный порог взрывчатого разложения образцов при оптимальной массовой доли χ_{opt} ,
 V – скорость ударной волны в воздухе,
 P_{max} – максимальное значение давления (в отн.ед.) УВ в воздухе,
 t_{max} – время достижения P_{max}



Материально-техническая база

Импульсный YAG:Nd³⁺-лазер LQ929 (SOLAR Laser Systems, г. Минск)

Режимы работы:

- Модуляция добротности (14 нс)
- Свободная генерация (120 мкс)

Характеристики:

Энергия в импульсе до 1,2 Дж

Частота следования импульсов до 10 Гц

Генерация гармоник – 532 нм, 355 нм, 266 нм



Электронный ускоритель ГИН-600

- энергия электронов 250 КэВ;
- плотность тока до 3 кА/см²;
- длительность импульса 2-20 нс.



Спектрофотохронограф СХ-1А (ООО «Научные и специальные прецизионные приборы и системы», г. Москва)

- спектральный диапазон 300-800 нм;
- спектральное разрешение 10 нм;
- диапазон развертки 160 нс – 2 мс;
- временное разрешение от 2 нс



Фотоэлектронные умножители Hamamatsu H-10707-21

Цифровые осциллографы TDS 7404B (4 ГГц), LeCroy WJ332A (300 МГц)

Пьезоакустические преобразователи

Фотометрический шар

Анализатор газов SRS QMS 30 (Диапазон масс От 1 до 300 м.е.)



НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

- **Лазерное инициирование взрыва ВВ.**

Исследуются механизмы преобразования энергии лазерного излучения во взрывчатых веществах, что позволит разработать новые светочувствительные нанокompозитные взрывчатые материалы для компонентов и устройств специального назначения

- **Нелинейное поглощение электромагнитного излучения наночастицами металлов.**

Исследуются процессы поглощения электромагнитного излучения в системе прозрачная матрица – наночастица металла, что позволит разработать новые подходы для функционирования целого класса технических приложений, таких как переключающие устройства лазерной оптики, солнечные батареи, фотокатализаторы, фотосинтетические и люминесцентные системы

- **Лазерное инициирование термохимических процессов в углях.**

Исследуются механизмы преобразования энергии лазерного излучения в твердых топливах, что позволит разработать новые способы зажигания твердого топлива

- **Получение синтез-газа и водорода из угля и суспензий металлических частиц под действием лазерного излучения.**

Исследуются механизмы реакций образования синтез-газа в процессах пиролиза и газификации углей при лазерном воздействии.

МНОГОФАКТОРНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОНКИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В УСЛОВИЯХ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ



Разработка научных основ и модели взрывчатого разложения слабопоглощающих излучение бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц при лазерном инициировании с учетом факторов, влияющих на порог инициирования взрыва.







