

**СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ТЭНА, СОДЕРЖАЩЕГО НАНОЧАСТИЦЫ ЗОЛОТА***А. В. Каленский, И. Ю. Зыков, В. Г. Кригер, А. П. Никитин, Б. П. Адуев***SPECTRAL DEPENDENCE OF CRITICAL DENSITY OF ENERGY FOR INITIATION OF PETN (PENTAERYTHRITYL TETRANITRATE) CONTAINING NANO-PARTICLES OF GOLD***A. V. Kalenskiy, I. Yu. Zykov, V. G. Krieger, A. P. Nikitin, B. P. Aduev*

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госзадание № 2014/64) и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (№ 14-03-00534 А).*

Работа посвящена расчету основных параметров инициирования взрывного разложения пентаэритритатетранитрата (тэна), содержащего наночастицы золота: зависимостей коэффициентов эффективности поглощения от размера наночастиц в матрице тэна, критической (минимальной) плотности энергии инициирования взрывного разложения системы тэн – золото, для первой (1064 нм) и второй (532 нм) гармоник неодимового лазера. При переходе от первой ко второй гармонике неодимового лазера наблюдается сдвиг максимума эффективности поглощения в сторону малых радиусов включений от 99 нм для первой гармоники, до 22 нм – для второй. Величина максимального коэффициента эффективности поглощения при этом возрастает от 0.100 до 4.878. Рассчитанные значения критической плотности энергии инициирования тэна, содержащего наночастицы золота, составили: для первой гармоники 552 мДж/см<sup>2</sup>; для второй – 15 мДж/см<sup>2</sup>, при радиусах металлических включений 94 и 26 нм соответственно. Сделан вывод, что композит тэн-золото является перспективным материалом для использования его в качестве капсуля оптического детонатора, который может быть создан на базе второй гармоники неодимового лазера.

The paper focuses on calculation of the basic parameters of initiation of the explosive decomposition of pentaerythrityl tetranitrate (PETN) containing nano-particles of gold: the dependences of the ratios of absorption effectiveness on the size of nano-particles in the matrix of PETN, critical (minimum) energy density of initiation of explosive decomposition of PETN – gold system, for the first (1064 nm) and second (532 nm) harmonics of neodymium laser. Upon transfer from the first to the second harmonic of neodymium laser the authors observed the shift of the maximum of effectiveness of absorption to the side of small radii of metal inclusions from 99 nm for the first harmonic to 22 nm – for the second. The value of the maximum ratio of absorption effectiveness in this case grows from 0.100 to 4.878. The calculated values of critical density of energy for initiation of PETN containing nano-particles of gold is: 552 mJ/cm<sup>2</sup> for the first harmonic; 15 mJ/cm<sup>2</sup> for the second, with radii of metal inclusions of 94 and 26 nm respectively. The authors conclude that the PETN – gold composite is a promising material for use as percussion cap of the optical detonator, which can be created on the base of the second harmonic of neodymium laser.

**Ключевые слова:** наночастицы золота, коэффициент эффективности поглощения, моделирование, энергетические материалы, безопасные взрывчатые вещества.

**Keywords:** gold nanoparticles, absorptivity, simulation, energetic materials, safety explosives.

**Введение**

Создание энергетических материалов, селективно чувствительных к лазерному излучению с целью получения капсульных составов для оптических детонаторов ведется уже более двух десятилетий. Разработаны оптические детонаторы на основе различных инициирующих взрывчатых веществ: азидов серебра и свинца, перхлоратов меди, железа, кобальта и др. Недостатком использования таких веществ является их низкая селективность к внешним воздействиям. Высокая чувствительность оптических детонаторов на основе инициирующих взрывчатых веществ к удару, трению, нагреву, радиации и т. д. может приводить к их несанкционированному срабатыванию. Поэтому они не получили широкого применения. Одним из основных направлений создания рабочего тела оптических детонаторов в настоящее время является введение в существующие взрывчатые вещества (ВВ) светочувствительных добавок [1].

В качестве добавок в данной работе предлагается использовать наночастицы золота. Золото является химически инертным металлом, поэтому можно утверждать, что золото не взаимодействует с ВВ, а также не покрывается оксидной пленкой. Это упрощает механизм химической реакции, приводящей к взрывному разложению ВВ, и уменьшает число неизвестных факторов, влияющих на поведение системы. Благодаря инертным свойствам золота композиты на основе ВВ-золото могут являться модельным объектом для изучения процессов взрывного разложения.

Для возникновения взрывного разложения необходимо наличие механизмов положительной обратной связи, которые могут приводить к самоускорению химической реакции. Существует два основных механизма положительной обратной связи: увеличение температуры, приводящее к экспоненциальному росту скорости реакции [1 – 4], и лавинообразное увеличение неравновесной концентрации реагентов, также приводящее к росту скорости

реакции [5 – 7]. Во втором случае выделяющаяся в элементарном акте энергия частично расходуется на образование активных частиц, что может приводить к развитию реакции по цепному механизму [8; 9].

В работе [10] было показано, что добавки сильнопоглощающих свет наночастиц позволяют снизить критическую плотность энергии лазерного инициирования пентаэритритатетранитрата (тэна). Показана принципиальная возможность использования вторичных ВВ содержащих сильнопоглощающие свет наночастицы в качестве капсуля оптического детонатора. Доказана роль малых включений как центров поглощения световой энергии в объеме вторичных взрывчатых веществ. Поглощение энергии излучения наночастицами приводит к быстрому переходу в тепло за времена порядка пикосекунды. Из этого следует, что действие излучения на такие системы может приводить к появлению малых очагов разогрева, которые становятся центрами инициирования взрывного разложения. К данным системам применима микроочаговая модель теплового взрыва.

Микроочаговая модель инициирования взрывного разложения лазерным излучением основывается на предположении, что в объеме прозрачного энергетического материала находятся включения, эффективно поглощающие лазерное излучение. Предполагается, что основным следствием поглощения света включениями является их нагрев, приводящий к увеличению температуры окружающего энергетического материала и образованию очага самоподдерживающейся экзотермической реакции. В микроочаговой модели предполагается, что коэффициент эффективности поглощения света металлическими наночастицами не зависит от длины волны излучения, размеров и природы поглощающей частицы (значение коэффициента эффективности поглощения  $Q_{abs}$  принимается равным единице).

Целью настоящей работы является оценка в рамках теории Ми спектральной зависимости коэффициентов эффективности поглощения наночастиц золота в матрице тэна, расчет минимального значения плотности энергии взрывного разложения тэна, содержащего наночастицы золота для первой и второй гармоники неодимового лазера.

В прессованных таблетках тэна коэффициент диффузного отражения света на длине волны 1064 нм составляет 0.88, поэтому попадающий в образец свет претерпевает многократные отражения на границах зерен прессованных порошков. В силу хаотичности актов отражения происходит усреднение освещенности по направлениям, что позволяет использовать (как и в работах [1; 11 – 14]) при расчетах сферическую симметрию, считая включение также сферическим. Основные процессы, учитываемые в модели, – нагрев наночастицы лазерным излучением, отвод тепла в энергетический материал и химическая реакция экзотермического разложения взрывчатого вещества. Данные процессы описываются системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + k_0 \frac{nQ}{c} \cdot \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right), x > R \\ \frac{\partial n}{\partial t} &= -k_0 n \cdot \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right), x > R, n = 1, \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha_M \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right), x < R. \end{aligned} \quad (1)$$

граничным условием при  $x = R$ :

$$J - c_M \alpha_M \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow R-0} + c \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow R+0} = 0, \quad (2)$$

где  $T$  – температура,  $E$  – энергия активации разложения,  $k_0$  – предэкспонент,  $Q$  – тепловой эффект реакции,  $\alpha$  и  $\alpha_M$  – коэффициенты температуропроводности с материалов матрицы и включения  $R$  – радиус включения,  $c$  и  $c_M$  – объемная теплоемкость материалов матрицы и включения,  $n$  – доля неразложенного взрывчатого вещества,  $J(t)$  – поглощаемая плотность мощности излучения лазерного импульса. При расчетах использованы значения параметров:

$$c = 2.22 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{К}) [5], c_M = 2.7 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{К}) [5],$$

$$E = 165 \text{ КДж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) [5], k_0 = 1.2 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1} [5],$$

$$\alpha = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} [5],$$

$$\alpha_M = 0.97 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}, Q = 9.64 \text{ КДж}/\text{см}^3 [5].$$

Для величины  $J(t)$  использовалось выражение:

$$J(t) = \sqrt{\pi} \cdot Q_{abs} R^2 k_i H_0 \cdot \exp(-k_i^2 t^2), \quad (3)$$

где  $k_i = 8.235 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  – параметр, определяющий длительность импульса (соответствует длительности импульса на полувысоте 20 нс);  $H_0$  – плотность энергии за импульс;  $Q_{abs}$  – коэффициент эффективности поглощения, который равен отношению интенсивностей поглощенного и падающего на включение потоков излучения. Величина  $Q_{abs}$  зависит как от радиуса включения, так и от длины волны излучения. Множители уравнения (3) нормируют интеграл от  $J(t)$  по времени на  $H_0$ .

Коэффициент эффективности поглощения ( $Q_{abs}$ ) сферическим включением радиуса  $R$  в рамках теории Ми рассчитывался по методике, приведенной в работах [15; 16]. При расчетах коэффициента эффективности поглощения необходим комплексный показатель преломления, который в свою очередь также зависит от длины волны падающего излучения [17].

Необходимо либо экспериментально определить комплексный показатель преломления включений при данной длине волны, либо интерполировать по имеющимся в литературе значениям на интересующую нас длину волны. В работе [18] реализована методика интерполяции имеющихся экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Так как показатель преломления состоит из

двух частей (действительной  $n$  и мнимой  $m$ ), то при заданной длине волны  $\lambda$  каждая часть определяется отдельно. Интерполяция комплексного показателя преломления проведена методом наименьших квадратов. В результате получен следующий показатель преломления золота для длины волны 1064 нм:  $m_i = 0.1877 - 6.438i$ , для длины волны 532 нм:  $m_i = 0.4231 - 2.322i$  [18].

Используя данные показатели преломления в рамках теории Ми, рассчитаны зависимости коэффициентов эффективности поглощения  $Q_{abs}$  от радиуса наночастиц золота в матрице тэна для длин волн света 1064 и 532 нм включений. Они приведены на рис. 1 и 2 (зависимости обладают различным масштабом, что делает невозможным их наглядное представление в одной координатной сетке). При расчетах полагали, что коэффициент преломления ТЭНа составляет  $m_0 = 1.54$  и не зависит от длины волны света.

Кривые имеют максимум, положение которого определяется, в основном, длиной волны света. При меньших радиусах кривая спадает до нуля, причем в пределе  $r \rightarrow 0$  выполняется закон Рэлея. При больших радиусах происходит выход на плато с осцилляциями. Влияние длины волны в рамках теории Ми связано с тем, что аргументами специаль-

ных функций, по которым ведется разложение, являются величины  $\rho = 2\pi R m_0 / \lambda$  и  $m_i \rho / m_0$ . Если бы величина  $m_i$  не зависела от длины волны, то зависимости  $Q_{abs}(\rho)$  совпали бы. Действительная и мнимая части  $m_i$  могут изменяться в несколько раз при изменении длины волны, что делает ситуацию сложнее, что и продемонстрировано на рисунках 1 и 2.

Значение коэффициента эффективности поглощения для длины волны 1064 составляет  $0.100 \pm 0.001$  при радиусе включения 99 нм, в то время как для длины волны 532 составляет  $4.878 \pm 0.001$  при радиусе включения 22 нм.

Отношение коэффициентов эффективности поглощения между первой и второй гармоникой неодимового лазера составляет почти 50 раз.

Построены спектральные зависимости коэффициента эффективности поглощения ( $Q_{abs}$ ) и радиуса включения, обладающего максимальной эффективностью поглощения ( $R_{max}$ ). Данные зависимости приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

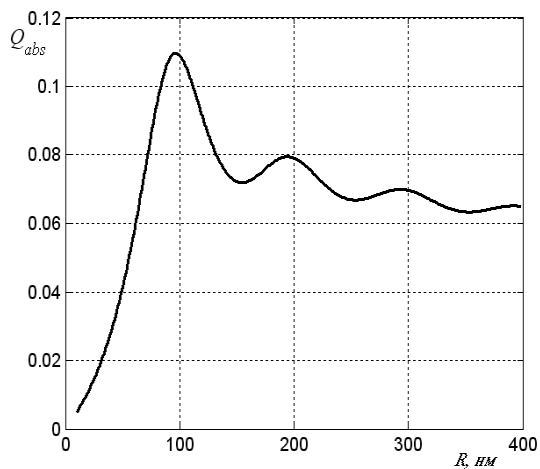


Рис. 1. Зависимость значения коэффициента эффективности поглощения от радиуса включения  $R$ . Длина волны 1064 нм,  $m_i = 0.1877 - 6.438i$

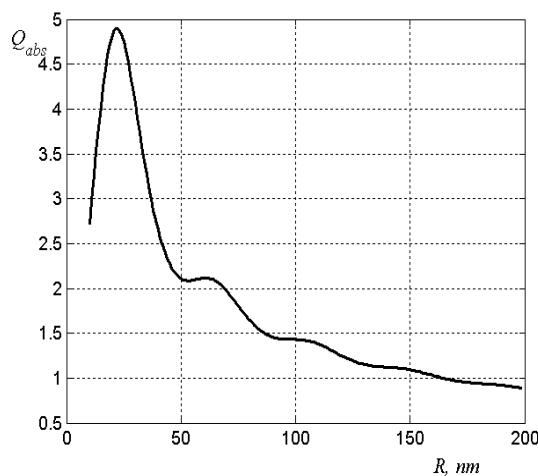


Рис. 2. Зависимость значения коэффициента эффективности поглощения от радиуса включения  $R$ . Длина волны 532 нм,  $m_i = 0.4231 - 2.322i$

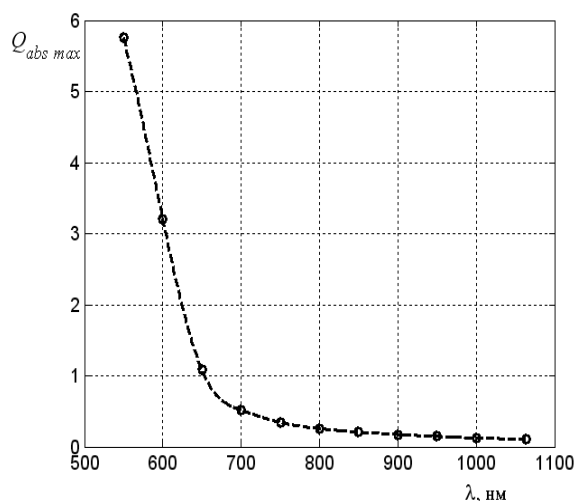


Рис. 3. Зависимость радиуса включения золота в тэне обладающего максимальной эффективностью поглощения ( $R_{max}$ ) от длины волны

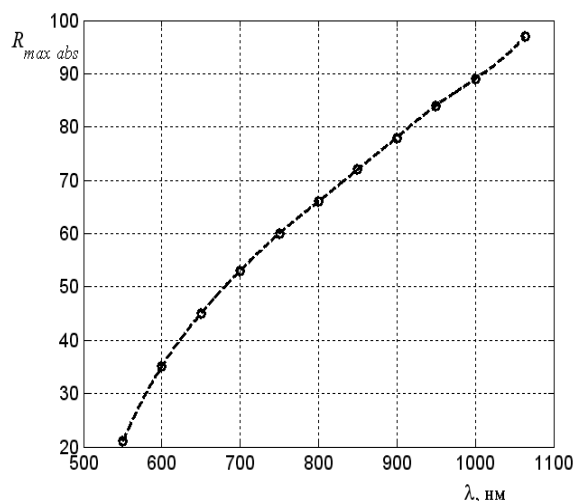


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента эффективности поглощения ( $Q_{abs}$ ) наночастиц золота в тэне

Также как для наночастиц алюминия [13], радиус наиболее поглощающего включения увеличивается с ростом длины волны, для золота зависимость практически линейна. Коэффициент эффективности поглощения, напротив, уменьшается при сдвиге в длинноволновую область, причем после длины волны 550 нм падение значительно. Для длин волн более 700 нм значение коэффициента эффективности поглощения не превышает 0.5, в то время как для 550 нм около 5.

Для расчета критической (минимальной) плотности энергии инициирования взрывного разложения тэна, содержащего наночастицы золота численно, решались уравнения модели (1) – (3) на сетке с переменным шагом по координате. Для размеров включений  $R \geq 30$  нм шаг в окрестностях включения составлял не более 1/20 толщины прогретого за время импульса инертного вещества ( $\sqrt{2\alpha/k_i}$ ), далее размер ячейки увеличивался по закону геометрической прогрессии таким образом, чтобы слой окружающего материала имел суммарную толщину не менее  $8R$ . При использованной длительности импульса длина прогрева составляла  $\approx 50$  нм, размер ячеек около включения  $\approx 2.5$  нм. Соответственно характерное время выравнивания температуры между двумя соседними ячейками составляло  $t_1 = 57$  пс. Поэтому используемая сетка достоверно описывает теплофизические процессы вплоть до температуры

$$\frac{E}{k_B \ln(k_0 t_1)} \approx 1500 \text{ К.}$$

Формирование очага реакции происходит при значительно меньших температурах, что позволяет использовать настоящую методику для численного решения уравнений модели (1) – (3). Шаг сетки внутри включения превышал шаг снаружи в  $\sqrt{\alpha_M/\alpha}$  раз. Ячейка с границей раздела включение-матрица

содержала как слой материалов матрицы, так и включения толщиной в половину шага сетки для каждого вещества. При использованных параметрах размер ячейки во включении составлял  $\sim 10$  нм, что близко к толщине слоя поглощения света, составляющую для большинства металлов менее 10 нм. Для размеров включений  $20 \geq R > 10$  нм использовалась одна ячейка (10 нм) внутри включения и далее ячейка с границей раздела включение-матрица. Для размеров включений  $R \leq 10$  нм использовалась ячейка с включением и границей раздела включение-матрица. Данная методика позволяет корректно учитывать поглощение света при помощи граничного условия (2) [19].

Полученная после разбиения пространства на ячейки система обыкновенных дифференциальных уравнений решалась методом Рунге-Кутты 1 – 5 порядка с переменным шагом по времени. Относительная погрешность на шаге интегрирования не превышала  $10^{-9}$ , при этом интегральная относительная погрешность, оцениваемая по точности выполнения закона сохранения энергии, не превышала  $2.5 \cdot 10^{-5}$ .

Определение минимальной плотности энергии инициирования взрывного разложения (критической плотности энергии) ТЭНа, содержащего наночастицы хрома, проводилось следующим образом [20 – 21]:

1. Рассчитывалась зависимость коэффициента эффективности поглощения от радиуса частицы, определялся размер частицы, имеющий максимальный коэффициент эффективности поглощения.

2. По уравнениям (1-3) рассчитывалась минимальная для данного радиуса наночастицы плотность энергии импульса, инициирующего взрывное разложение ( $H(R)$ ). Расчет проводился до тех пор, пока минимальная плотность энергии, приводящая к взрыву ( $H_{min e}$ ), отличалась от максимальной плотности энергии, не приводящей к взрыву ( $H_{max d}$ ), не более чем на 0.01 % ( $1 - H_{max d}/H_{min e} < 0.0001$ ).

3. Значения радиусов частицы, при которых производился расчет  $H(R)$ , выбирались до тех пор, пока рассчитанные для этих размеров  $H$  не образуют ряд с выраженным минимумом. Далее по рассчитанным значениям критических плотностей энергии инициирования  $H(R)$  проводилась интерполяция квадратичной функцией для определения положения минимума. После этого рассчитывалась критическая плотность энергии в точке минимума. Процедура шага 1 – 3 повторялась, пока точность определения критического радиуса частицы с минимальной плотностью энергии инициирования взрывного разложения ( $H_c$ ) не достигала 1 нм.

Рассчитанная зависимость критической плотности энергии инициирования взрывного разложения композита тэн-золото от радиуса наночастицы металла для первой гармоники неодимового лазера при длительности импульса 20 нс представлена на рис. 5.

Значение критической плотности энергии инициирования велико (552 мДж/см<sup>2</sup> при радиусе наночастицы 94 нм) и превосходит аналогичную величину для алюминия в 3 раза [12-13]. Из этого можно сделать вывод, что наночастицы золота в матрице тэна являются недостаточно чувствительными для лазерного излучения первой гармоники неодимового лазера (1064 нм). Однако рассчитанные спектральные зависимости коэффициента эффективности поглощения и радиуса наночастицы, обладающей максимальной эффективностью поглощения, позволяют утверждать, что включения золота в тэне должны обладать низкой критической плотностью энергии инициирования для излучения второй гармоники неодимового лазера (532 нм). Величина максимального коэффициента эффективности поглощения возрастает при переходе от первой ко второй гармонике неодимового лазера почти в 50 раз от 0.100 (для 1064 нм) до 4.9 (для 532 нм). Рассчитанное значение критической плотности энергии инициирования тэна, содержащего нано-

частицы золота, составили для второй гармонике 15 мДж/см<sup>2</sup> при радиусе металлического включения 26 нм. Значения критической плотности энергии в единицы и десятки мДж/см<sup>2</sup> характерны для низкопорогового инициирования взрывного разложения иницирующих ВВ импульсом неодимового лазера. В данном случае столь низкие значения критической плотности энергии получены на вторичных (бризантных) ВВ, имеющих крайне низкую чувствительность к удару и спонтанным электрическим наводкам. Следовательно, композит тэн-золото является перспективным материалом для использования его в качестве капсуля оптического детонатора, который может быть создан на базе второй гармоники неодимового лазера.

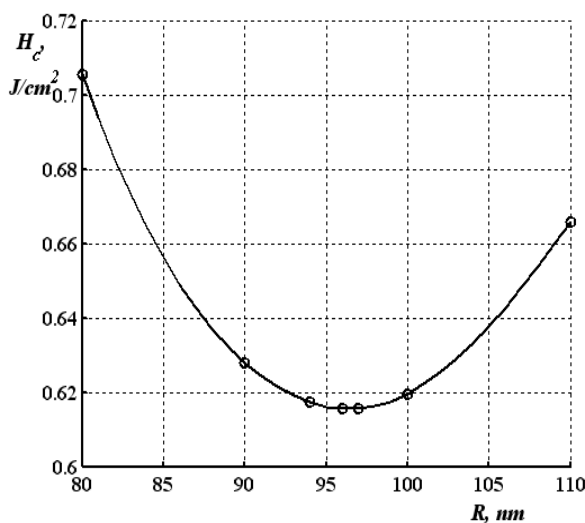


Рис. 5. Зависимость критической плотности энергии инициирования тэна от радиуса наночастицы золота для длины волны 1064 нм

### Литература

1. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Фурега Р. И., Звекон А. А., Каленский А. В. Взрывчатое разложение ТЭНа с нанодобавками алюминия при воздействии импульсного лазерного излучения различной длины волны // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 8. С. 39 – 42.
2. Чумаков Ю. А., Князева А. Г. Иницирование реакции в окрестности одиночной частицы, нагреваемой СВЧ излучением // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 28. № 2. С. 24 – 30.
3. Гришаева Е. А., Каленский А. В., Ананьева М. В., Звекон А. А. Неизотермическая модель разветвленной цепной реакции взрывного разложения энергетических материалов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 1. С. 44.
4. Каленский А. В., Ананьева М. В., Гришаева Е. А., Звекон А. А., Кригер В. Г. Условия реализации режимов цепного и теплового взрывов энергетических материалов // Вестник КемГУ. 2014. № 1 (57). Т. 1. С. 201 – 206.
5. Кригер В. Г., Каленский А. В., Звекон А. А. Релаксация электронно-возбужденных продуктов твердофазной реакции в кристаллической решетке // Химическая физика. 2012. Т. 31. № 1. С. 18 – 22.
6. Кригер В. Г., Каленский А. В., Звекон А. А., Боровикова А. П., Гришаева Е. А. Определение ширины фронта волны реакции взрывного разложения азида серебра // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 4. С. 129 – 136.
7. Каленский А. В., Ананьева М. В., Кригер В. Г., Звекон А. А. Коэффициент захвата электронных носителей заряда на экранированном отталкивающем центре // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 4. С. 11 – 16.

8. Каленский А. В., Булушева Л. Г., Кригер В. Г., Мазалов Л. Н. Моделирование граничных условий при квантово-химических расчетах азидов металлов в кластерном приближении // Журнал структурной химии. 2000. Т. 41. № 3. С. 605 – 608.
9. Кригер В. Г., Каленский А. В., Звекон А. А., Ананьева М. В., Боровикова А. П. Диффузионная модель разветвленной цепной реакции взрывного разложения азидов тяжелых металлов // Химическая физика. 2009. Т. 28. № 8. С. 67 – 71.
10. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Пузынин А. В. Влияние добавок частиц монокарбида никеля на чувствительность тетранитропентаэритрита к лазерному инициированию // Химическая физика. 2009. Т. 28. № 11. – С. 45 – 48.
11. Кригер В. Г., Каленский А. В., Коньков В. В. Пороговая энергия инициирования азида серебра эксимерным лазером // Материаловедение. 2003. № 7. С. 2 – 8.
12. Ананьева М. В., Каленский А. В., Гришаева Е. А., Зыков И. Ю., Никитин А. П. Кинетические закономерности взрывного разложения ТЭНа, содержащего наноразмерные включения алюминия, кобальта и никеля // Вестник КемГУ. 2014. № 1 (57). Т. 1. С. 194 – 200.
13. Каленский А. В., Звекон А. А., Ананьева М. В., Зыков И. Ю., Кригер В. Г., Адуев Б. П. Влияние длины волны лазерного излучения на критическую плотность энергии инициирования энергетических материалов // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 3. С. 98 – 104.
14. Ananyeva M. V., Kriger V. G., Kalenskii A. V., Zvekov A. A., Borovicova A. P., Grishaeva E. A., Zycov I. Yu. Comparative analysis of energetic materials explosion chain and thermal mechanisms // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 11/3. С. 13 – 17.
15. Кригер В. Г., Каленский А. В., Звекон А. А., Зыков И. Ю., Адуев Б. П. Влияние эффективности поглощения лазерного излучения на температуру разогрева включения в прозрачных средах // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 6. С. 54 – 58.
16. Kalenskii A. V., Kriger V. G., Zvekov A. A., Grishaeva E. A., Zycov I. Yu., Nikitin A. P. The Microcenter Heat Explosion Model Modernization // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 11/3. С. 62 – 66.
17. Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В. Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Химия, 1984. С. 216.
18. Лукатова С. Г. Расчет коэффициентов эффективности поглощения для композитов золото-тэн на второй гармонике неодимового лазера // Международное научное издание Современные фундаментальные и прикладные исследования. 2014. № 1(12). С. 95 – 98.
19. Кригер В. Г., Каленский А. В., Звекон А. А., Зыков И. Ю., Никитин А. П. Процессы теплопереноса при лазерном разогреве включений в инертной матрице // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 3. – С. 375 – 382.
20. Ананьева М. В., Звекон А. А., Зыков И. Ю., Каленский А. В., Никитин А. П. Перспективные составы для капсуля оптического детонатора // Перспективные материалы. 2014. № 7. С. 5 – 12.
21. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Звекон А. А., Каленский А. В., Никитин А. П., Лисков И. Ю. Исследование оптических свойств наночастиц алюминия в тетранитропентаэритрите с использованием фотометрического шара // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 9. С. 126 – 131.

#### **Информация об авторах:**

**Каленский Александр Васильевич** – профессор кафедры химии твердого тела КемГУ, [kriger@kemsu.ru](mailto:kriger@kemsu.ru).  
**Alexandr V. Kalenskii** – professor Department of Solid State Chemistry Kemerovo State University.

**Зыков Игорь Юрьевич** – аспирант кафедры химии твердого тела КемГУ, [kriger@kemsu.ru](mailto:kriger@kemsu.ru).  
**Igor J. Zykov** – postgraduate Department of Solid State Chemistry Kemerovo State University.

**Кригер Вадим Германович** – доктор химических наук, профессор кафедры химии твердого тела КемГУ, [kriger@kemsu.ru](mailto:kriger@kemsu.ru).

**Vadim G. Kriger** – professor Department of Solid State Chemistry, Kemerovo State University.

**Никитин Андрей Павлович** – аспирант Института углехимии и химического материаловедения СО РАН.  
**Andrey P. Nikitin** – postgraduate of Institute of Coal-chemistry and Material Science of the Siberian branch of the RAS.

**Адуев Борис Петрович** – доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Института углехимии и химического материаловедения СО РАН, [lesinko-iuxm@yandex.ru](mailto:lesinko-iuxm@yandex.ru).

**Boris P. Aduev** – Doctor of Physics and Mathematics, Vice-Director for Science at the Institute of Coal-chemistry and Material Science of the Siberian branch of the RAS.

Статья поступила в редколлегию 31.07.2014 г.