

## ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ СМЕСИ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА И ЭНЕРГОЕМКИХ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ И СОЕДИНЕНИЙ

*Р. И. Фурега, Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов*

## LASER INITIATION OF THE MIXTURE OF TETRANITROPENTAERITRIT WITH METALS AND COMPOUNDS ENERGETIC NANOPARTICLES

*R. I. Furega, B. P. Aduiev, D. R. Nurmukhametov*

*Работа выполнена при финансовой поддержке регионального гранта РФФИ № 13-03-98032 р\_сибирь\_а.*

При лазерном воздействии проведены измерения порогов взрывчатого разложения тэна с добавками Al, Al-C, Ni, Co, «Kemerit®», наночастиц с различным содержанием Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в частице. Измерены скорости разлета продуктов взрыва некоторых материалов. Измерены пороги взрывчатого разложения в зависимости от начальной температуры переплавленных и прессованных образцов Ni-C и Al. Показано, что при содержании добавки 0.1 % Al, чувствительность к удару уменьшается относительно образцов, не содержащих добавки. Это позволяет рассматривать данный смесевой состав как перспективный материал для светодетонаторов.

Thresholds of explosive degradation of PETN with different additives in the laser exposure were measured, with the additives being Al, Al-C, Ni, Co, «Kemerit®», nanoparticles with different content Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The expansion velocity of the explosion products of certain materials was measured. Thresholds of explosive decomposition were measured with regard of the initial temperature and the melted extruded samples of Ni-C and Al. In presence of 0.1 % Al as additive, the sensitivity is shown to decrease, as compared to samples containing no additives. This allows us to consider this part of mixtures a promising material for light detonators.

**Ключевые слова:** взрыв, тэн, наночастицы, лазер, импульс.

**Keywords:** explosion, PETN, nanoparticles, laser pulse.

Исследование механизма лазерного инициирования ВВ является актуальной фундаментальной задачей, не решенной до настоящего времени, и требует проведения комплекса разноплановых измерений с применением различных методов и подходов, а также теоретического моделирования процессов.

Прикладной аспект проблемы – это исследование и разработка новых энергетических материалов, которые можно применять в качестве детонаторов, инициируемых лазерными импульсами. Последние имели бы ряд преимуществ перед электродетонаторами, применяемыми в настоящее время в угольной, горнодобывающей промышленности, специальной и военной технике. Электродетонаторы чувствительны к электрическим и электромагнитным наводкам, зарядам статического электричества, конструктивно имеют в своем составе инициирующие взрывчатые вещества, чувствительные к удару. Применение светодетонаторов в ряде случаев позволит решить эти проблемы и повысить безопасность работ с взрывчатыми веществами. Один из перспективных путей разработки таких материалов – исследование смесевых составов вторичных взрывчатых веществ и наноразмерных энергоемких частиц.

В данной работе исследованы пороги взрывчатого разложения композитов на основе тэна и наночастиц различного сорта в зависимости от содержания включений в экспериментальных образцах: Al, изготовленных газофазным и электровзрывным методами, Ni, Co, механокомпозита Ni-C, Al-C, наноструктурированного углеродного материала «Kemerit®».

Подготовка образцов осуществлялась следующим образом. На аналитических весах производились навески порошка тэна и необходимого включения. Далее проводилось перемешивание навесок. Смесь по-

мещалась в гексан и в ультразвуковую ванну до получения равномерного распределения наночастиц по объему смеси. Производилась сушка смеси и навеска необходимого количества для изготовления образца. Далее производилось прессование образца с помощью гидравлического пресса и специальной пресс-формы. Образец прессовали в медной пластине (кристаллодержателе) толщиной 1 мм, в центре которой имелось отверстие  $d = 3$  мм. В результате прессования в центре пластины получались образцы  $d = 3$  мм и толщиной 1 мм, массой  $m = 12.2 \pm 0.2$  мг, плотностью  $\rho = 1.73 \pm 0.03$  г/см<sup>3</sup>. (В отдельных экспериментах применялась меньшая плотность образцов).

В качестве источников инициирования использовался лазер на фосфатном стекле с неодимом (1060 нм, 20 нс) и лазер на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом (1064 нм, 12 нс), работающие в режиме модуляции добротности. Световая энергия вводилась в образец с помощью двухлинзового телескопа. Диаметр зоны облучения составлял 2.5 мм. На массивной стальной подложке располагалась дюрелевая пластина-свидетель, на которую клали кристаллодержатель с образцом. Со стороны облучения образец накрывался стеклянной пластиной для уменьшения газодинамической разгрузки.

На определенной плотности энергии лазера облучалось 10 образцов и определялась вероятность взрыва. За факт взрыва принимался громкий звуковой сигнал и отпечаток на дюрелевой пластине свидетеле диаметром, равным диаметру образца. Варьируя плотность энергии импульса лазера, получаем кривую вероятности взрывов для образцов с определенным содержанием включений (пример для включений Al приведен на рис. 1).

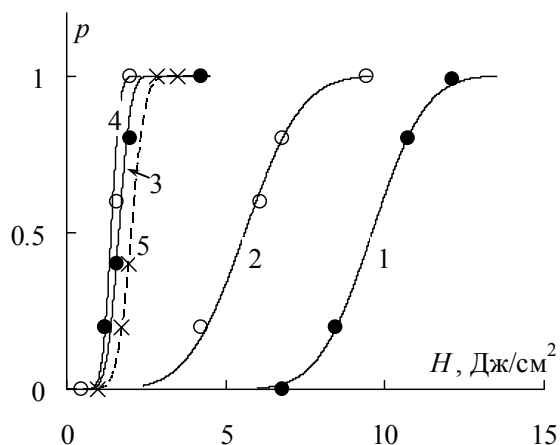


Рис. 1. Зависимость вероятности взрыва  $p$  от плотности энергии инициирующего импульса  $H$  для различных концентраций наночастиц Al в образце (в вес. %). 1 – 0.025 %, 2 – 1 %, 3 – 0.3 %, 4 – 0.1 %, 5 – 0.1 % "Alex"

По кривым вероятности взрывов (рис. 1) определялась критическая энергия  $H_{cr}$ , соответствующая 50 % вероятности взрыва для образцов с различным содержанием включений. Эксперимент повторялся с использованием различных включений. Результат представлен на рис. 1. Как видно из рис. 2, в условиях эксперимента чувствительность образцов можно регулировать в широких пределах. Оптимальная концентрация включений, при которой достигается максимальная чувствительность, составляет величину 0.1 – 0.3 % по массе. Наименьший порог взрывчатого разложения достигнут для включений 0.1 % Al при использовании лазера на иттрий – алюминиевом гранате ( $H_{cr} = 1.15$  Дж/см<sup>2</sup>).

Наличие оптимальной концентрации наночастиц, как указывалось в [1], мы связываем с возможностью скопления частиц на границах зерен поликристалла при изготовлении образцов и в связи с этим необходимостью более высокой пороговой плотности энергии для зажигания основного вещества при увеличении концентрации выше оптимальной.

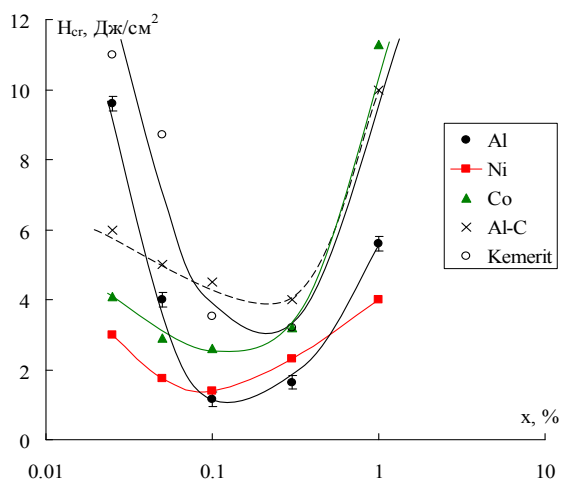


Рис. 2. Пороги инициирования с различным

Отметим также, что расчет  $H_{cr}$  по эмпирической формуле, приведенной в [3] для плотности образцов 1.73 г/см<sup>3</sup>, составляет величину ~170 Дж/см<sup>2</sup>. (Экспериментальные данные отсутствуют, поскольку требуется лазер с большей энергией в импульсе). Таким образом, увеличение чувствительности к лазерному воздействию, достигнутое в эксперименте, составляет величину > 100.

Проведены эксперименты на образцах с плотностью 1.1 г/см<sup>3</sup>. В этом случае возможно инициирование взрыва образцов, не содержащих наночастицы. Значение критической плотности составило величину  $H_{cr} = 26.5$  Дж/см<sup>2</sup>. Использование образцов с оптимальной концентрацией наночастиц Al при 1.1 г/см<sup>3</sup> дает величину  $H_{cr} = 5$  Дж/см<sup>2</sup>. По-видимому, при меньшей плотности образца ухудшается контакт наночастиц с поликристаллом тэна, что приводит к увеличению  $H_{cr}$ , по сравнению с более плотными образцами.

Эксперименты с использованием порошка марки Alex<sup>TM</sup> показали, что несмотря на одинаковые размеры с частицами, изготовленными газозафазным методом, при оптимальной концентрации наночастиц в образце  $H_{cr} = 2$  Дж/см<sup>2</sup>. Измерение с помощью электронно-зондового микроанализа показало, что содержание Al в порошке первого типа составляло 76 %, а в порошке второго типа – 84 %, т. е. не эта характеристика определяет порог взрывного разложения. Отметим, что порошок первого типа выделяет большую энергию при окислении, что может являться причиной меньшего порога инициирования. Измерение удельной поверхности методом ВЕТ дало следующие результаты: для порошка, изготовленного методом газозафазного синтеза,  $S_{sp} = 24$  м<sup>2</sup>/г, для порошка марки Alex<sup>TM</sup> –  $S_{sp} = 16$  м<sup>2</sup>/г. Таким образом, меньшая удельная поверхность наночастиц Alex<sup>TM</sup> имеет меньшую площадь контакта с матрицей, что также может привести к увеличению  $H_{cr}$ .

Вообще говоря, роль удельной поверхности применяемых включений в настоящее время никак не учитывается микроочаговой теорией лазерного зажигания, в связи с этим представляет интерес исследование с применением материалов с большими удельными поверхностями. Был проведен эксперимент с использованием углеродного материала «Kemerit<sup>®</sup>», синтезированного в ИУХМ СОРАН [2]. Используемые частицы имели характерные размеры ~1 мкм и  $S_{sp} \approx 900$  м<sup>2</sup>/г, измеренную методом ВЕТ. Зависимость порога взрывного разложения от содержания углеродных частиц представлена на рис. 2. Полученное минимальное значение  $H_{cr} = 3.2$  Дж/см<sup>2</sup> превышает таковое для металлических включений малых размеров. Однако этот эксперимент следует повторить после получения углеродных частиц с высокой удельной поверхностью  $S_{sp}$  размером  $0.1 \pm 0.2$  мкм.

Проведены измерения порога взрывчатого разложения тэна оптимальной концентрацией наночастиц Al 0.1 масс % при инициировании второй гармоникой лазера (512 нм). Обнаружено, что порог инициирования в случае второй гармоники меньше в 1.65 раза,

чем для кривой, и составляет величину  $H_{cr} = 0.7 \text{ Дж/см}^2$ .

Проведены эксперименты по измерению временных и амплитудных характеристик давления продуктов взрыва с помощью пьезоакустического детектора для образцов с плотностью  $1.73 \text{ г/см}^3$ , содержащих различные концентрации газофазного *Al* и *Al-C*. Воздействие на все группы образцов производилось импульсами с плотностью энергии  $45 \text{ Дж/см}^2$ , при которой вероятность взрыва  $p \approx 0.99$ .

Установлено, что временной интервал возрастания давления (т.е. время превращения образца в газообразные продукты) составляет величину  $4.5 - 5 \text{ мкс}$ . Измерены зависимости амплитуды давления от концентрации наночастиц в образцах. Максимальное давление продуктов взрыва наблюдается при оптимальной концентрации наночастиц. Это свидетельствует о том, что при оптимальной концентрации наночастиц достигается максимальное превращение образца в газообразные продукты.

С помощью пьезоакустического детектора, устанавливаемого на различных расстояниях от образца, измерялась скорость разлета продуктов взрыва, совпадающая на малых расстояниях со скоростью ударной волны в воздухе. Использовали образцы с  $\rho = 1.73 \text{ г/см}^3$  с содержанием  $0.1 \text{ масс \% Al}$   $H_{cr} = 1.4 \text{ Дж/см}^2$  и образцы плотностью  $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$  без содержания *Al*  $H_{cr} = 26.5 \text{ Дж/см}^2$ .

Время полета продуктов взрыва в зависимости от расстояния до пьезодетектора представлено на рис. 3.

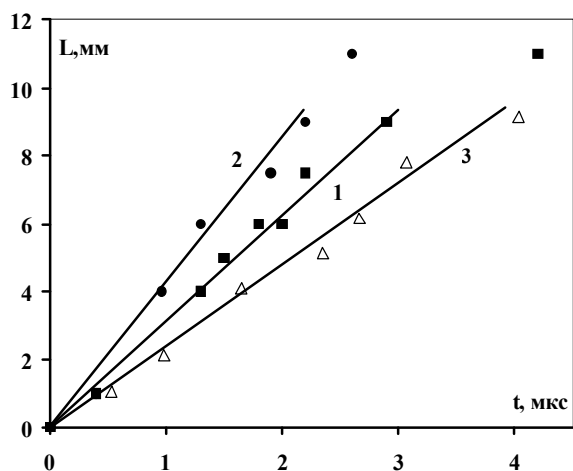


Рис. 3. Зависимость времени разлета продуктов взрывного разложения тэна от расстояния между образцом и пьезопреобразователем (1 – «чистый» тэн, 2 – содержащий 0.1 % *Al* плотность образца  $1.1 \text{ г/см}^3$ , 3 – содержащий 0.1 % *Al* плотность образца  $1.73 \text{ г/см}^3$ )

Эксперимент проводился при плотности энергии импульса лазера  $H = 45 \text{ Дж/см}^2$ . По наклону прямых определены скорости разлета продуктов взрыва  $V = \Delta L / \Delta t$ . Для образцов с плотностью  $\rho = 1.73 \text{ г/см}^3$   $V = 2500 \text{ м/с}$ , для образцов с  $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$  не содержащих *Al*  $V = 3300 \text{ м/с}$ , содержащих *Al*  $V = 4500 \text{ м/с}$ . Таким образом, несмотря на большие значения  $H_{cr}$  на образцах с  $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$ , по сравнению с  $\rho = 1.73 \text{ г/см}^3$ ,

скорость разлета продуктов для малоплотных образцов значительно выше. Это свидетельствует о том, что при меньших плотностях образцов в условиях эксперимента можно достичь большей полноты взрыва. Необходимо продолжение экспериментов в этом направлении с целью нахождения оптимальных параметров плотности образцов  $\rho$ ,  $H_{cr}$  и концентрации добавок в образцах.

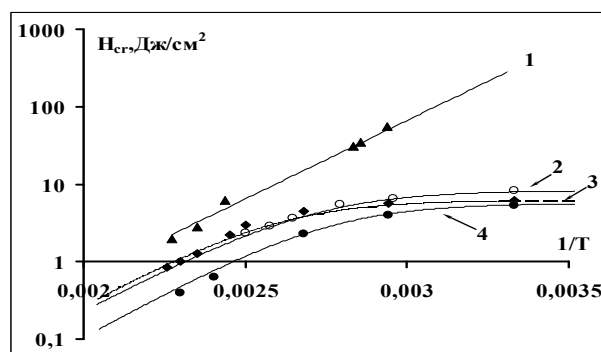


Рис. 4. Зависимость пороговой плотности энергии иницирования  $H_{cr}$  от температуры для «чистого» тэна (1), прессованных ( $\rho = 1.73 \text{ г/см}^3$ ) образцов тэна, содержащих 0.3 % наночастиц *Ni-C* (2), переплавленных образцов тэна, содержащих 0.3 % наночастиц *Ni-C* (3) и образцов тэна, содержащих 0.1 % наночастиц *Al* (4)

Приводятся результаты экспериментов зависимости порога взрывчатого разложения от начальной температуры для переплавленных композитов, содержащих оптимальную концентрацию включений *Ni-C* и *Al*, а также для прессованных образцов с плотностью  $\rho = 1.73 \text{ г/см}^3$  с этими же включениями, и разработана математическая модель, объясняющая экспериментально измеренную зависимость порога взрывного разложения от начальной температуры образца при лазерном иницировании.

В качестве источника иницирования использовался лазер на фосфатном стекле, активированным неодимом ( $1.06 \text{ мкм}$ ,  $20 \text{ нс}$ ).

Измерялась зависимость вероятности взрыва от плотности энергии иницирующего импульса  $H$  при различных начальных температурах образцов и определялась критическая плотность энергии  $H_{cr}$ , соответствующая 50 % вероятности взрыва при конкретной температуре. Результаты представлены на рис. 4.

При обработке экспериментальных результатов исходим из модели иницирования ВВ в «горячих точках». Предполагаем, что генерация очагов химического разложения происходит в результате поглощения лазерного излучения структурными дефектами тэна в образцах, не содержащих наночастицы, концентрация которых  $n_1 = \text{const}$  для конкретного синтеза и при заданной плотности и дисперсности образца. В смесевых составах помимо  $n_1$  излучение поглощается также наночастицами, концентрация которых в условиях эксперимента  $n_2 = \text{const}$ . Коэффициент поглощения лазерного излучения пропорционален концентрации поглощающих структурных дефектов  $\alpha_1$  тэна и наночастиц алюминия  $\alpha_2$ . Поскольку  $n_1$  и  $n_2$  в условиях эксперимента постоянны, то

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2. \quad (1)$$

Для образования центров химического разложения, приводящих к инициированию экзотермической реакции в окрестности нагретых дефектов структуры или включений необходимы затраты энергии.

В образцах, не содержащих включения, при заданной плотности, дисперсности и температуре образца объемная плотность энергетических затрат  $W_t$  есть величина постоянная. Однако мы предполагаем, что именно эта величина в рамках тепловой теории обуславливает зависимость порога взрывного разложения от температуры и для величины  $W_t$  можно использовать выражение:

$$W_t = W_0 e^{E/kT}, \quad (2)$$

где  $W_0$  – предэкспоненциальный множитель,  $E$  – эффективная энергия активации инициирования химической реакции.

Для образцов, содержащих включения примем  $W_n$  – затраты энергии в единице объема на образование очагов химического разложения в окрестности наночастиц, нагретых в результате поглощения лазерного излучения. При заданной плотности и дисперсности образцов, а также постоянной концентрации наночастиц и постоянной температуре  $W_n = \text{const}$ . Более того, в рамках данной модели мы полагаем также, что  $W_n$  не зависит от температуры. Действительно, коэффициент поглощения металлических частиц очень большой, и нагрев наночастиц в результате поглощения лазерного излучения может достичь  $\Delta T \geq 10^3 \text{K}$ .

Вполне вероятно, что при очень высокой температуре «горячей точки» изменение начальной температуры в интервале, используемом в эксперименте, не влияет на эффективность образования очагов химического разложения.

В рамках вышеизложенной постановки задачи записаны дифференциальные уравнения и получены решения для обработки экспериментальных данных.

Для образцов, не содержащих наночастиц:

$$H_{cr} = A e^{E/kT}, \quad (3)$$

где

$$-W_0 \frac{\ln(1 - \frac{n_{cr}}{n_1})}{\alpha_1} = A \equiv \text{const} \quad (4)$$

( $n_{cr}$  – критическая концентрация очагов химического разложения, при которой происходит взрыв образца).

Последнее уравнение линеаризуется в аррениусовых координатах:

$$\ln H_{cr} = \ln A + \frac{E}{kT} \quad (5)$$

На рис. 4 прямая 1 построена методом наименьших квадратов при значениях параметров  $A = 4.3 \cdot 10^5 \text{ Дж/см}^2$ ,  $E = 0.42 \pm 0.05 \text{ эВ}$ .

Для образцов, содержащих добавки наночастиц:

$$H_{cr}(T) = \frac{B}{1 + \frac{W_n}{W_0} e^{-E/kT}}, \quad (6)$$

где

$$B = -\frac{W_n}{\alpha} \ln \left( 1 - \frac{n_{cr}}{n_2} \left( \frac{1 + \frac{W_0}{W_n} e^{E/kT}}{\frac{n_1}{n_2} + \frac{W_0}{W_n} e^{E/kT}} \right) \right) \quad (7)$$

В первом приближении логарифм в (7) можно принять независимым от температуры, что следует как из структуры выражения, стоящего под знаком логарифма, так и слабой зависимостью логарифма от температуры по сравнению с экспонентой стоящей в знаменателе выражения (6). Поэтому примем  $B = \text{const}$ . Выражение (6) содержит два подгоночных параметра  $B$  и  $W_n/W_{0.5}$ , поэтому его удобно представить в следующем виде:

$$\ln \left( \frac{B}{H_{cr}} - 1 \right) = \ln \frac{W_n}{W_0} - \frac{E}{kT} \quad (8)$$

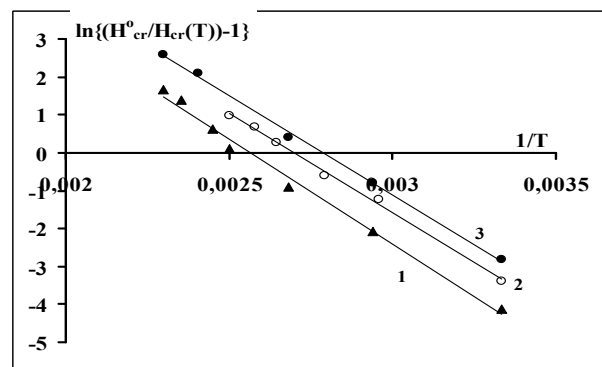


Рис. 5. Зависимость критической плотности энергии инициирования  $H_{cr}$  от температуры для образцов тэна, содержащих 0.3% наночастиц Ni-C (1), прессованных ( $\rho = 1.7 \text{ г/см}^3$ ) образцов тэна, содержащих 0.3% наночастиц Ni-C (2) и для образцов тэна, содержащих 0.1% наночастиц Al (3) в координатах (16), с использованием в качестве аргумента  $1/T$

Сплошные кривые 2, 3 на рис. 4 и прямые на рис. 5 построены по формулам (6) и (8) при значении параметров для наночастиц Ni-C:  $B = 6.3 \text{ Дж/см}^2$ ,  $W_n/W_0 = 1.5 \cdot 10^6$ ,  $E = 0.48 \text{ эВ}$ ; для наночастиц Ni-C в случае плотных образцов:  $B = 8.3 \text{ Дж/см}^2$ ,  $W_n/W_0 = 1.4 \cdot 10^6$ ,  $E = 0.45 \text{ эВ}$ ; для наночастиц Al:  $B = 5.9 \text{ Дж/см}^2$ ,  $W_n/W_0 = 1 \cdot 10^6$ ,  $E = 0.42 \text{ эВ}$ .

Для смешанного состава при  $T \rightarrow 0$  из формулы (6) имеем  $H_{cr}^0 = B$ .

Как следует из экспериментальных кривых 2, 3 и 4 на рис. 4, это условие удовлетворительно выполняется при  $T \leq 300 \text{ K}$ , т. е. процесс взрывного разложения при комнатной температуре в основном определяется образованием очагов химического разложения в окрестности наночастиц. Оценка по формуле (6) с использованием рассчитанных параметров  $E$  и  $W_n/W_0$  показывает, что при 295 K  $H_{cr}$  уменьшается относительно величины  $B$  на 4 %.

Таким образом, предложенная модель удовлетворительно описывает экспериментальные результаты.

При рассмотрении роли включений в инициирование взрыва лазерными импульсами можно рассмот-

реть две возможности, которые приводят к наблюдаемым эффектам.

Для проверки эффекта рассеяния был проведен следующий эксперимент. Использовались те же наночастицы Al, что и в предыдущих экспериментах. Известно, что наночастицы Al изготовлены методом газофазного синтеза в УрО РАН с содержанием металла 74% на момент проведения эксперимента и, соответственно, содержанием  $Al_2O_3 = 26\%$ . Содержание металла измерялось при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM63901A, оснащенного спектрометром JEOL JED2400. Путем частичного отжига на воздухе получали наночастицы с содержанием металла 60 %, 47 %, 30 % и 13 %. При этом распределение по размерам наночастиц практически не изменялось. Изготавливались образцы с содержанием 0.1 масс % включений с различным содержанием активного Al в частице. Проводилось измерение кривых частоты и определялся порог взрыва  $H_{кр}$ . Результат представлен на рис. 6.

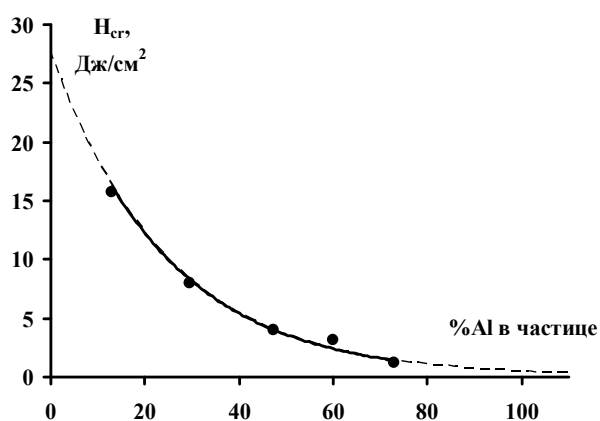


Рис. 6. Зависимость порога инициирования взрывчатого разложения от содержания алюминия в отдельной наночастице

Как видно из рис. 6, уменьшение содержания металла в наночастице ведет к увеличению порога взрывчатого разложения. В частности, уменьшение содержания Al с 74 % до 13 % увеличивает порог взрывного разложения в 12.5 раз. Этот результат позволяет сделать вывод, что введение в качестве добавок наночастиц с высоким соотношением металл/окислитель вносит доминирующий вклад в снижение порога взрывного разложения тэна и подтверждает предположение о том, что в результате поглощения излучения металлом происходит его нагрев до высокой температуры с образованием очагов химического разложения в окрестности «горячей точки».

С другой стороны, относительно невысокий порог ( $H_{кр} = 15.6 \pm 0.5$  Дж/см<sup>2</sup>) при использовании в качестве добавок наночастиц  $Al_2O_3$  (с содержанием активного алюминия 13 %), прозрачных для лазерного излучения, позволяет сделать вывод, что эффекты рассеяния также дают значительный вклад в снижение порога. Эксперименты, проведенные с использованием образцов «чистого» тэна с плотностью  $\rho = 1.73$  г/см<sup>3</sup> показали, что при максимально возможных плотно-

стях энергии в условиях эксперимента  $\sim 60$  Дж/см<sup>2</sup> (при фокусировке излучения до диаметра 1.5 мм, при котором размерный эффект можно не учитывать [2]) инициирование взрыва не происходило. Таким образом, в реальных условиях эксперимента, по-видимому, следует учитывать как фактор поглощения, так и фактор рассеяния, однако, доминирующую роль играет поглощение излучения для частиц с большим содержанием металла и тонкой оксидной пленкой.

Использование исследованных образцов в качестве материала для светодетонатора перспективно только в том случае, если применяемая добавка, по крайней мере, не увеличивает чувствительность основного материала (в данном случае тэна) к удару.

В связи с вышеизложенным в настоящей работе проведено испытание образцов на чувствительность к удару.

Процедура подготовки смесевых составов аналогична описанной выше. Образцы изготавливались методом прессования, имели характерные размеры 3x1 мм и плотность  $\rho = 1.73$  г/см<sup>3</sup>.

Образцы устанавливались на стальной плите, при этом поверхности их были свободными. Взрыв осуществлялся при сбрасывании груза массой 2 кг с высоты 50 см и фиксировался по громкому звуковому сигналу и световой вспышке.

Проводились испытания на образцах, не содержащих наночастицы, а также с содержанием Al 0.1; 0.5; 1, 3, 10 % по массе. Для каждого типа образцов проводилось 25 испытаний, и определялась вероятность взрыва как отношение числа взорвавшихся образцов к общему числу образцов в серии. Результаты представлены в таблице. Как видно из табл. 1, зависимость вероятности взрыва  $p$  от содержания алюминия в образцах имеет немонокотонный характер. Минимальной чувствительности к удару соответствует максимальная чувствительность к лазерному излучению, что свидетельствует о различии в инициировании взрыва при лазерном и ударном воздействии. Для образцов, не содержащих добавки Al, и образцов с добавками Al 0.1 % по массе измерены также кривые вероятности взрывов в зависимости от высоты падения груза, представленные на рис. 7. Каждой экспериментальной точке соответствует 10 испытаний.

Таблица 1  
Зависимость вероятности взрыва от содержания наночастиц алюминия в образцах при ударном воздействии

% Al	0	0.1	0.5	1	3	10
$p$	0.75	0.35	0.45	0.65	0.9	1

В работах [4; 5] исследовалась механическая чувствительность металлизированных взрывчатых веществ на примере октогена и гексогена с добавками микронных и наночастиц Al. Показано, что наноконпозицы и механические смеси ВВ с нанодисперсным алюминием характеризуются исключительно высокой чувствительностью по сравнению с составами, содержащими порошок металла микронного размера. Дано объяснение полученным результатам, согласно

которому возрастание чувствительности обусловлено дополнительным энерговыделением тепла при химическом взаимодействии компонентов в очагах механического разогрева.

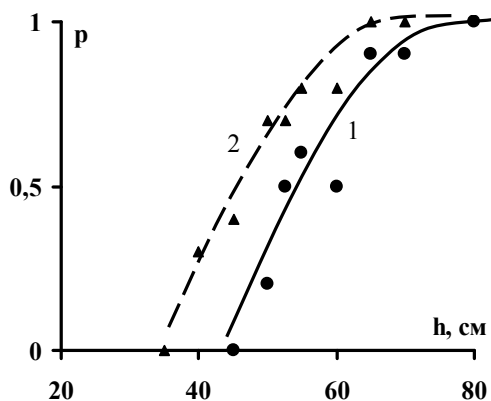


Рис. 7. Зависимость вероятности взрыва от высоты падения груза: 1 – для образцов, содержащих 0.1% наночастиц Al; 2 – для «чистых» образцов тэна

Выше приведенные эксперименты не противоречат взглядам автора [4; 5] при использовании > 3 %

#### Литература

1. Адуев, Б. П. Влияние добавок наночастиц монокарбида никеля на чувствительность тетранитропентаэритрита к лазерному воздействию / Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, А. В. Пузынин // Химическая физика. – 2009. – Т. 28. – № 11. – С. 50 – 53.
2. Патент РФ № 2206394. Способ получения наноструктурированного углеродного материала / Ч. Н. Барнаков, С. К. Сеит-Аблаева, А. П. Козлов [и др.]. Оpubл. 20.06.2003. Бюл. № 17.
3. Таржанов, В. И. Лазерное инициирование тэна / В. И. Таржанов, А. Д. Зинченко, В. И. Сдобнов // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32. – № 4. – С. 113.
4. Теселкин, В. А. Механическая чувствительность ультрадисперсных металлизированных ВВ / В. А. Теселкин // Симпозиум по горению и взрыва. – Черноголовка, 2005. – С. 165.
5. Теселкин, В. А. Влияние размера частиц компонентов на механическую чувствительность металлизированных взрывчатых веществ / В. А. Теселкин // Химическая физика. – 2008. – Т. 27. – № 8. – С. 43 – 52.
6. Holian, V. L. White Atomic mechanism for hot spot initiation / V. L. Holian, T. C. German, J. V. Maillet [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2002. – V. 89. – № 28. – P. 285501-1-285501-4.

#### Информация об авторах:

**Фурега Роман Игоревич** – аспирант, инженер лаборатории энергетических соединений и нанокompозитов Института углекими и химического материаловедения СО РАН, [lesinko-iuxm@yandex.ru](mailto:lesinko-iuxm@yandex.ru).

**Roman I. Furega** – post-graduate student, Engineer at the Laboratory of Energy Compounds and Nanocomposites, Institute of Coal Chemistry and Material Science of the Siberian Branch of the RAS, [lesinko-iuxm@yandex.ru](mailto:lesinko-iuxm@yandex.ru).

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

**Boris P. Aduev** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Deputy Director for Science at the Institute of Coal Chemistry and Material Science of the Siberian Branch of the RAS, [lesinko-iuxm@yandex.ru](mailto:lesinko-iuxm@yandex.ru).

**Нурмухаметов Денис Рамильевич** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории энергетических соединений и нанокompозитов Института углекими и химического материаловедения СО РАН, [lesinko-iuxm@yandex.ru](mailto:lesinko-iuxm@yandex.ru).

**Denis R. Nurmukhametov** – Candidate of Physics and Mathematics, Researcher at the Laboratory of Energy Compounds and Nanocomposites, Institute of Coal Chemistry and Material Science of the Siberian Branch of the RAS, [lesinko-iuxm@yandex.ru](mailto:lesinko-iuxm@yandex.ru).

добавок Al в образцы тэна. Однако образцы с содержанием Al < 3 % в работах [4; 5] не исследовались.

Предположительное объяснение наблюдаемого эффекта может быть следующим. Принято считать, как, например, в [6], что при ударных воздействиях на пористые образцы происходит сжатие газовых включений до высоких давлений, что вызывает их нагрев и инициирование химической реакции. При этом размеры газовых включений менее определенного критического значения химическую реакцию не инициируют [6]. Если предположить, что эффективный размер газового включения за счет попадания в него наночастицы Al уменьшается, то данный механизм работает менее эффективно, в частности с использованием добавки Al 0.1 % по массе. Напротив, нагрев наночастицы лазерным излучением вызывает эффективное зажигание химической реакции, как следует из наших экспериментов. При увеличении концентрации наночастиц >3% по массе ситуация меняется. Проявляются эффекты, рассмотренные в [4; 5], приводящие к увеличению чувствительности к удару. Для лазерного воздействия, напротив, скопление наночастиц в близко расположенных точках пространства ведет к менее эффективному нагреву и повышению порога взрывного разложения.