

УДК 535.341,544.454

## ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ КОМПОЗИТОВ ТЭН — УГОЛЬ НА ПОРОГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Г. М. Белокуров, Я. В. Крафт,  
З. Р. Исмагилов

Институт углекислоты и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углекислоты СО РАН, 650000 Кемерово, lesinko-iuxm@yandex.ru

Представлены результаты измерения порогов взрывчатого разложения композитов тэн — уголь при воздействии импульсов лазерного излучения ( $\lambda = 1064$  нм,  $\tau = 14$  нс). Исследованы образцы толщиной 1 мм, плотностью 1.1 и 1.7 г/см<sup>3</sup> с включениями субмикронных частиц бурого угля (750 нм). У композитов плотностью 1.7 г/см<sup>3</sup> матрица практически прозрачна для излучения. Минимальный порог взрыва 1.8 Дж/см<sup>2</sup> достигается при концентрации включений 0.5 % (по массе). Взрыв имеет адиабатический характер. У композитов плотностью 1.1 г/см<sup>3</sup> матрица является рассеивающей. Минимальный порог взрыва 2.3 Дж/см<sup>2</sup> получен при концентрации включений 1 %. Сделана оценка показателя экстинкции:  $k_{ext} = 135$  см<sup>-1</sup>. Поглощение излучения происходит на глубине <0.1 мм. Развитие взрывчатого разложения в необлученной части протекает по ударно-волновому механизму либо механизму взрывного горения.

Ключевые слова: лазерное инициирование, тэн, бурый уголь, низкометаморфизованный уголь, лазер, оптоакустика, фотометрический шар.

DOI 10.15372/FGV20200214

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых композитных материалов с высокой чувствительностью к воздействию лазерных импульсов актуальна для применения их в качестве светодетонаторов, обладающих повышенной безопасностью при работе по сравнению с другими видами детонаторов для штатных взрывчатых веществ [1, 2].

В этом направлении хорошие результаты показали композиты на основе тэна и ультрадисперсных металлов, например Al, Fe, Ni [3–5].

В работе [6] проведено исследование инициирования тэна с включениями субмикронных частиц бурого и длиннопламенного газового углей. Показано, что пороги инициирования таких композитов близки к порогам лазерного инициирования композитов тэн — металлы, однако использование такого дешевого матери-

ала, как уголь, может уменьшить стоимость композита, что важно для практических применений.

Что касается механизма инициирования, оказалось, что начальные его этапы для композитов тэн — металл и тэн — уголь протекают совершенно различным образом. Для плотных образцов ( $\rho = 1.7$  г/см<sup>3</sup>) тэн — Al (при оптимальной концентрации включений  $n_{opt}$ , соответствующей минимальному порогу взрывчатого разложения  $H_{cr}^{min}$ ) показатель экстинкции равен  $k_{ext} = 200$  см<sup>-1</sup> и поглощение излучения происходит в слое  $\approx 50$  мкм, что вызывает возникновение ударной волны в слое, распространяющейся в необлученную часть образца, и в конечном итоге взрыв образца [6]. Для композитов тэн — уголь значение  $H_{cr}^{min}$  достигается при  $k_{ext} = 8$  см<sup>-1</sup>, поэтому поглощение излучения происходит во всем объеме образца толщиной 1 мм, что приводит к началу экзотермических реакций в частицах угля, воспламенению летучих веществ в образце, дальнейшему запуску химических реакций в тэне в окрестности угольных частиц и взрыву образца [6], т. е. взрыв имеет адиабатический характер.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН (проект АААА-А17-117041910150-2, руководитель Адуев Б. П.) на оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ УУХ СО РАН.

© Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Крафт Я. В., Исмагилов З. Р., 2020.

Настоящая работа является продолжением работы [6]. Проведено сравнительное исследование порогов взрывчатого разложения композитов тэн — уголь при лазерном воздействии на образцы плотностью  $\rho = 1.7$  и  $1.1 \text{ г/см}^3$ .

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В качестве матрицы для композитного материала использовался синтезированный нами порошок тэна с узким гранулометрическим распределением с максимумом в нем  $1 \div 2 \text{ мкм}$ , аналогичный порошок в работах [3–6]. В качестве включений, как и в [6], применялись частицы бурого угля с размером в максимуме распределения  $750 \text{ нм}$ . Получение частиц угля, их характеристики и изготовление образцов композитов методом прессования описано в работе [6]. Были изготовлены образцы плотностью  $\rho = 1.7$  и  $1.1 \text{ г/см}^3$ . Массовая концентрация включений частиц угля в тэне варьировалась в интервале  $0.125 \div 5 \%$ . Для инициирования взрыва, как и в [6], использовалась первая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с  $\text{Nd}^{3+}$ , работающего в режиме модуляции добротности. Длительность импульса составляла  $14 \text{ нс}$ , максимальная энергия в импульсе  $1.5 \text{ Дж}$ . Изменение энергии осуществлялось с помощью калиброванных нейтральных светофильтров, а ее измерение — с помощью пироэлектрического приемника Ophir PE50BF-C.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Медная пластина толщиной  $1 \text{ мм}$  с запрессованным образцом помещалась на дюралевую пластину-свидетель, расположенную на массивном основании с отверстием.

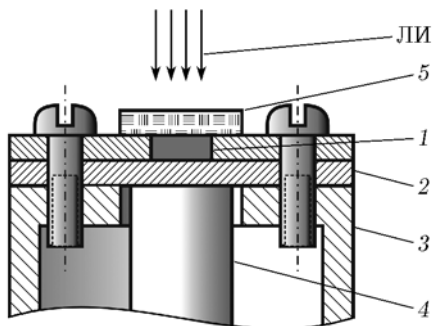


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — образец, 2 — пластина-свидетель, 3 — основание, 4 — керамика ЦТС-19, 5 — стеклянная пластина, ЛИ — лазерное излучение

С пластиной-свидетелем в акустическом контакте находилась акустическая задержка пьезодетектора на базе керамики ЦТС-19. Со стороны излучения образец накрывался стеклянной пластиной толщиной  $1 \text{ мм}$ , которая блокировала газодинамическую разгрузку образца. За факт взрыва принимались громкий звуковой сигнал, наличие отпечатка на пластине-свидетеле диаметром, равным диаметру образца, и сигнал пьезодетектора в микросекундном временном интервале, регистрируемый осциллографом LeCroy WJ323A.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Исследовались зависимости вероятности взрыва от плотности энергии импульса лазера (кривые частоты) с использованием образцов композитов тэн — уголь плотностью  $1.7$  и  $1.1 \text{ г/см}^3$ .

При фиксированных плотностях энергии и концентрациях включений последовательно облучали  $10$  образцов плотностью  $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$  единичным импульсом и определяли вероятность взрыва

$$P = N/10, \quad (1)$$

где  $N$  — число взорвавшихся образцов.

Варьируя плотность энергии лазера  $H$ , получали кривую частоты. Эксперимент повторяли, меняя в образцах массовую концентрацию включений в интервале  $n = 0.125 \div 5 \%$ . На

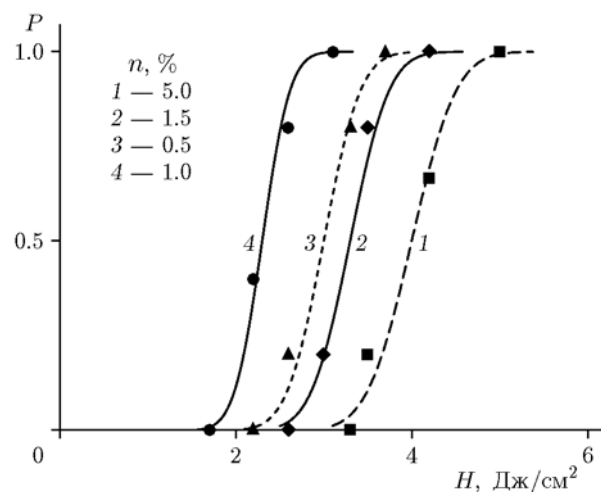


Рис. 2. Зависимость вероятности взрыва образцов от плотности энергии иницирующего импульса лазерного излучения при различных концентрациях включений угля в образцах

рис. 2 представлены кривые частоты для образцов плотностью  $1.1 \text{ г/см}^3$ . Сплошные линии проведены с применением интегральной функции ошибок и метода максимального правдоподобия [7]:

$$P(H) = \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{H - H_{cr}}{\sqrt{2}H_{cr}} \right). \quad (2)$$

По данным рис. 2 получены значения критической плотности  $H_{cr}$ , соответствующие 50%-й вероятности взрыва, которые далее служат для характеристики чувствительности образца к лазерному инициированию (порог инициирования взрыва). Среднеквадратичные отклонения  $\Delta H_{cr}$ , рассчитанные по формуле (2), используются в качестве доверительного интервала для  $H_{cr}$ . Аналогичные измерения и расчеты проведены также для образцов плотностью  $\rho = 1.7 \text{ г/см}^3$ .

На рис. 3 представлены результаты по критической плотности  $H_{cr}$ , полученные с использованием интегральной функции ошибок (2) для образцов плотностью  $\rho = 1.7$  и  $1.1 \text{ г/см}^3$ . Видно, что при  $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$  минимальный порог  $H_{cr} = 2.3 \text{ Дж/см}^2$  достигается при концентрации включений  $n = 1 \%$ . Для образцов плотностью  $1.7 \text{ г/см}^3$  минимальный порог  $H_{cr} = 1.8 \text{ Дж/см}^2$  достигается при  $n = 0.5 \%$ , как и в [6]. Однако в работе [6] получено меньшее значение  $H_{cr} = 1 \text{ Дж/см}^2$  при тех

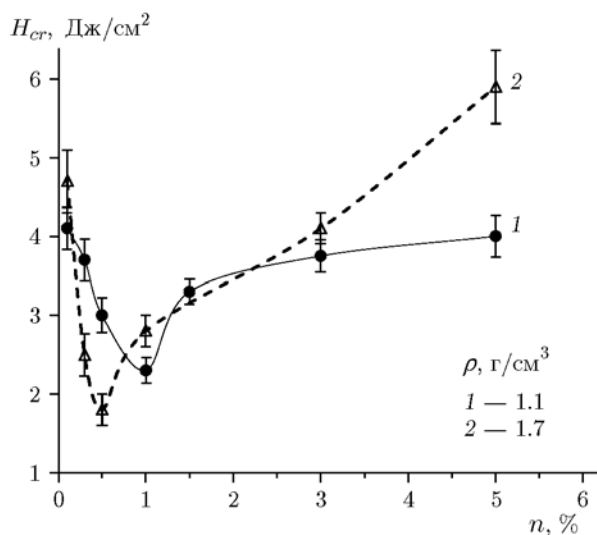


Рис. 3. Зависимость пороговой плотности энергии инициирования взрыва от концентрации включений угля в образцах различной плотности

же плотности и концентрации включений ( $\rho = 1.7 \text{ г/см}^3$ ,  $n = 0.5 \%$ ). Расхождение минимальных значений  $H_{cr}$  в [6] и данной работе связано с различием в условиях эксперимента.

В данной работе газодинамическая разгрузка образцов блокировалась только массой стеклянной пластины (поз. 5 на рис. 1). В [6] стеклянная пластина с помощью винтов прижималась к образцу сверху медной пластиной с отверстием для прохождения излучения, что ухудшало условия газодинамической разгрузки образца. Воспроизведение условий эксперимента [6] при  $n_{opt} = 0.5 \%$  дало  $H_{cr} = 1 \text{ Дж/см}^2$ , как и в [6]. Таким образом, видно, что изменение условий газодинамической разгрузки значительно сказывается на минимальном значении  $H_{cr}$ .

В данной работе использовались условия газодинамической разгрузки, подобные таковым в наших предыдущих работах на композитах тэн — металлы, например в [3–5]. Сравнение результатов данной работы и [3–5] показывает, что минимальные значения  $H_{cr}$  для композитов тэн — уголь в 2.5 раза выше, чем для композитов тэн — металлы. Если учесть, что эксперименты [3–5] выполнены с расчетными размерами металлических включений, близкими к оптимальным [8], а для углей оптимальные размеры рассчитать пока не представляется возможным, то можно предположить, что при оптимальных размерах включений углей и металлов различие значений  $H_{cr}$  будет меньше при одинаковых условиях эксперимента.

Для установления механизма поглощения света композитами тэн — уголь были измерены показатели экстинкции образцов  $k_{ext}$ .

Плотность образцов  $\rho = 1.7 \text{ г/см}^3$  близка к плотности монокристалла. Образцы тэн без включений при такой плотности практически прозрачны. Коэффициент отражения  $R = 10 \%$ , измеренный с помощью фотометрического шара на образцах без включений [9], близок к френелевскому коэффициенту при отражении от двух граней кристалла ( $R = 9.5 \%$ ). Измерение  $k_{ext}$  на таких образцах проведено в работе [6].

Зависимость  $k_{ext}$  от концентрации включений представлена на рис. 4, взятом из [6]. Поскольку для таких образцов коэффициент  $R$  близок к френелевскому, то в первом приближении можно вполне обоснованно считать диффузное рассеяние малой величиной и принять, что измеренные значения  $k_{ext}$  равны показате-

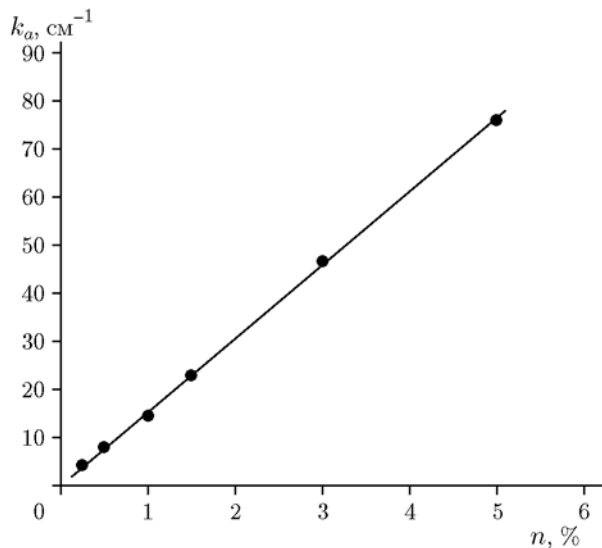


Рис. 4. Зависимость показателя поглощения образца от концентрации в нем включений угля (плотность образца 1.7 г/см<sup>3</sup>)

лям поглощения  $k_a$  образца тэна с включениями частиц угля.

Эксперимент показал, что образцы толщиной 1 мм, плотностью  $\rho = 1.1$  г/см<sup>3</sup> практически непрозрачны для лазерного излучения при концентрации включений  $n = 0 \div 5$  %, т. е. представляют собой рассеивающие системы, в отличие от образцов с  $\rho = 1.7$  г/см<sup>3</sup>. Однако возможно экспериментальное измерение показателя диффузного отражения  $R_\infty$  с дальнейшим использованием формулы Кубелки — Мунка [10]

$$\frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} = \frac{k_a}{k_s}, \quad (3)$$

где  $k_a$ ,  $k_s$  — показатели поглощения и рассеяния соответственно.

На рис. 5 представлены экспериментально измеренные с помощью фотометрического шара коэффициенты  $R_\infty$  в зависимости от концентрации включений.

С помощью выражения (3) была рассчитана зависимость  $k_a/k_s$  от содержания включений, которая приведена на рис. 6.

Как видим, зависимости  $k_a$  и  $k_a/k_s$  от концентрации включений на рис. 4 и 6 в погрешности эксперимента имеют линейный характер. Из линейных аппроксимаций рис. 4 и 6 можно рассчитать значение  $k_s = 412$  см<sup>-1</sup>, которое в погрешности эксперимента не зависит от концентрации включений, что, в принципе, разумно,

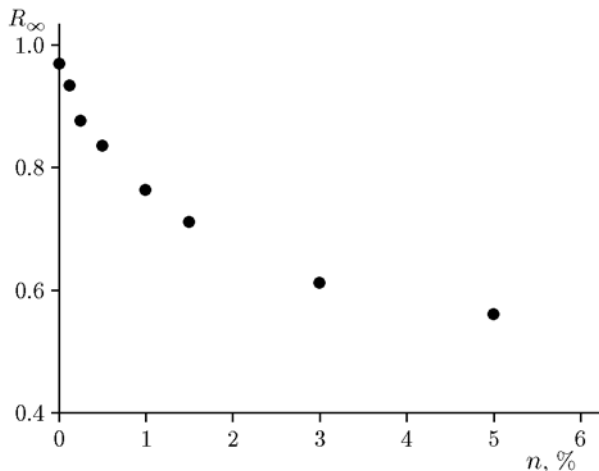


Рис. 5. Зависимость экспериментального значения коэффициента диффузного отражения от концентрации включений угля в образце (плотность образца 1.1 г/см<sup>3</sup>)

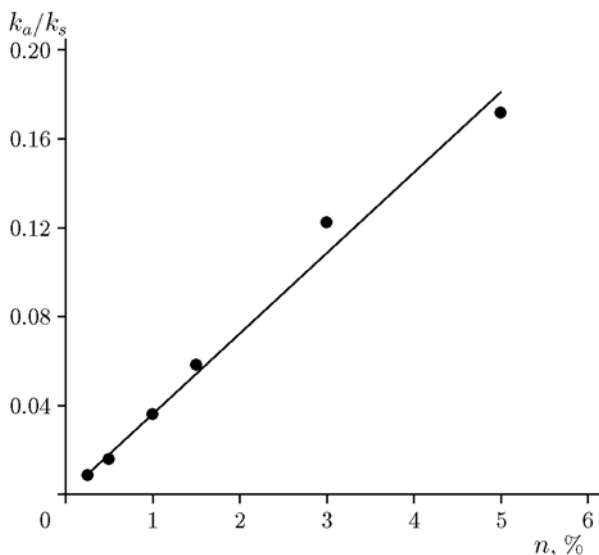


Рис. 6. Зависимость параметра  $k_a/k_s$ , рассчитанного по формуле (3), от концентрации включений угля в образце

но, поскольку рассеяние излучения осуществляется в основном пористой матрицей образца. Для рассеивающих сред в работе [11] получена формула

$$k_{ext} = [3k_a(k_a + k_s)]^{1/2}. \quad (4)$$

Используя (4) и приведенные выше значения  $k_a$  и  $k_s$ , можно рассчитать  $k_{ext}$  для образцов с  $\rho = 1.1$  г/см<sup>3</sup>. Результаты представлены на рис. 7. Видно, что показатель экстинкции образца  $k_{ext}$  практически линейно возрастает

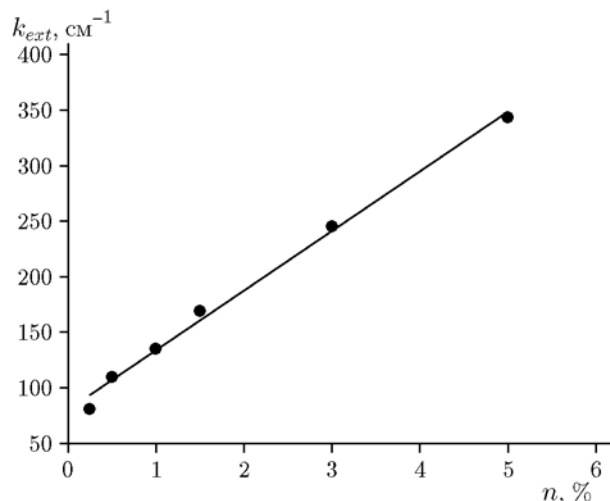


Рис. 7. Зависимость показателя экстинкции  $k_{ext}$ , рассчитанного по формуле (4), от концентрации включений угля в образце

с увеличением концентрации включений. При  $n_{opt} = 1\%$  он равен  $k_{ext} = 135 \text{ см}^{-1}$ , откуда находим, что слой ослабления излучения в  $e$  раз составляет  $d = k_{ext}^{-1} \approx 70$  мкм. Таким образом, в хорошо рассеивающих образцах плотностью  $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$  поглощение излучения происходит на глубине  $d < 0.1$  мм.

Образцы тэна с включениями частиц угля оптимальной концентрации  $n_{opt} = 0.5\%$  и плотностью  $\rho = 1.7 \text{ г/см}^3$  практически прозрачны для излучения. Для данных образцов  $k_{ext} = 8 \text{ см}^{-1}$ . При выполнении закона Бугера — Ламберта — Бэра в этом случае почти половина энергии лазерного излучения проходит через образец [6]. Возникновение акустического импульса в момент воздействия лазерного импульса на образец свидетельствует о том, что зажигание угольных включений в образце происходит во время импульса облучения [6] (см. также введение). Через  $200 \div 300$  нс акустический сигнал резко возрастает, что связано с началом экзотермической реакции в тэне [6].

Было проведено измерение начала участка возникновения акустического отклика на короткой развертке при повышенной чувствительности осциллографа для образцов плотностью  $1.1 \text{ г/см}^3$ . Результат представлен на рис. 8 (для сравнения приведен сигнал от образца плотностью  $\rho = 1.7 \text{ г/см}^3$ ). Как следует из рис. 8, для образцов с  $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$  во временном интервале от 0 до  $200 \div 300$  нс сигнал пьезодетектора отсутствует, затем начинается

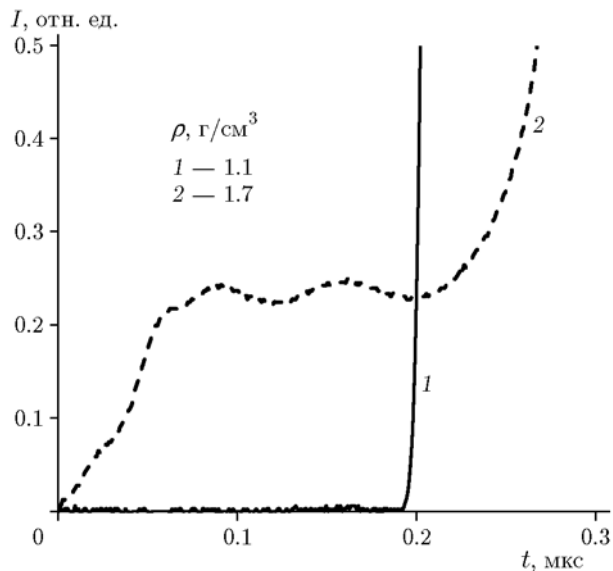


Рис. 8. Начальный участок оптико-акустического сигнала при взрыве образца

его резкий рост, аналогично как и для образцов с включениями Al [6].

Исходя из вышеописанного последний результат понятен. Излучение проникает на глубину  $\approx 70$  мкм, где поглощается частицами угля, образуя горячие точки (возможно, с зажиганием летучих веществ), инициирующие химическую реакцию. Далее реакция из облученного слоя распространяется по глубине кристалла, достигая пьезодетектора через  $200 \div 300$  нс. Можно предположить, что развитие взрыва происходит по ударно-волновому механизму. На данном этапе нельзя исключать механизм взрывного горения [12], согласно которому в случае рыхлых образцов горячие газообразные продукты проникают в поры и инициируют реакцию в необлученной части образца, опережая ударную волну.

Таким образом, механизмы взрывчатого разложения композитов ( $\rho = 1.7 \text{ г/см}^3$ ), частично прозрачных для лазерного излучения, и композитов ( $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$ ) с большим коэффициентом диффузного рассеивания могут значительно отличаться на начальном этапе инициирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Минимальные пороги лазерного инициирования взрыва образцов тэн — уголь плотностью  $\rho = 1.1$  и  $1.7 \text{ г/см}^3$  отличаются незначительно: соответственно  $H_{cr} = 2.3 \text{ Дж/см}^2$  (при

$n_{opt} = 1 \%$ ) и  $H_{cr} = 1.8 \text{ Дж/см}^2$  (при  $n_{opt} = 0.5 \%$ ).

2. В силу малости диффузного рассеяния, показатели поглощения  $k_a$  для образцов с  $\rho = 1.7 \text{ г/см}^3$  практически совпадают с показателями экстинкции  $k_{ext}$ . Поглощение излучения при  $n_{opt} = 0.5 \%$  происходит во всем объеме образца, что приводит к взрыву адиабатического характера.

3. Образцы плотностью  $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$  являются рассеивающими. Показатель экстинкции  $k_{ext} = 135 \text{ см}^{-1}$  при  $n_{opt} = 0.5 \%$ , глубина проникновения лазерного излучения  $\approx 70 \text{ мкм}$ . Химическая реакция начинается в тонком слое, распространяясь в необлученную часть. Характер развития взрывчатого разложения подобен таковому для композитов тэн — металлы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ahmad S. R., Cartwright M. Laser Ignition of Energetic Materials. — New York: John Wiley Sons, 2014.
2. Шейков Ю. В., Батъянов С. М., Калашникова О. Н., Луковкин О. М., Мильченко Д. В., Вахмистров С. А., Михайлов А. Л. О механизме инициирования алюминизированных бризантных взрывчатых веществ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 5. — С. 57–64.
3. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звеков А. А., Никитин А. П., Каленский А. В. Особенности лазерного инициирования композитов на основе тэна с включениями ультрадисперсных частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 6. — С. 104–110.
4. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Колмыков Р. П., Никитин А. П., Ананьева М. В., Звеков А. А., Каленский А. В. Взрывчатое разложение таблеток пентаэритриттетранитрата, содержащих наночастицы никеля различного радиуса // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 8. — С. 37–43.
5. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звеков А. А., Никитин А. П., Ковалев Р. Ю. Лазерное инициирование композитных материалов на основе тэна и наночастиц железа // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 7. — С. 38–43.
6. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Нелюбина Н. В., Ковалев Р. Ю., Никитин А. П., Заостровский А. Н., Исмагилов З. Р. Лазерное инициирование составов на основе тэна с включениями субмикронных частиц углей // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 108–115.
7. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
8. Кригер В. Г., Каленский А. В., Звеков А. А., Зыков И. Ю., Адуев Б. П. Влияние эффективности поглощения лазерного излучения на температуру разогрева включений в прозрачных средах // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 51, № 6. — С. 54–58.
9. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Фурега Р. И. Исследование вкладов рассеяния и поглощения света включениями наночастиц алюминия в тэне // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 3. — С. 70–75.
10. Кортюм Г., Браун В., Герцог Г. Принципы и методика измерения в спектроскопии диффузного отражения // Успехи физ. наук. — 1965. — Т. 85, № 2. — С. 365–380.
11. Gardner C. M., Jacques S. L., Welch A. J. Light transport in tissue: Accurate expressions for one-dimensional fluence rate and escape function based upon Monte Carlo simulation // Lasers Surg. Med. — 1996. — V. 18, N 2. — P. 129–138.
12. Апин А. Я. О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. — 1945. — Т. 50. — С. 285–288.

Поступила в редакцию 10.12.2018.

После доработки 12.02.2019.

Принята к публикации 22.05.2019.