

ческим руководством для повседневной деятельности ответственного работника за энергосбережение.

Междисциплинарная связь, отраженная в программе обучения, позволяет работникам овладеть навыками и компетенциями в области потребления, снабжения и рационального использования топливно-энергетических ресурсов и воды, расчетов экономической эффективности, энергоэффективного строительства, внедрению мероприятий по энергосбережению, применения инновационных технологических решений и возобновляемых источников энергии.

Для тех категорий работников, чья основная специальность не связана с прикладными техническими науками, курсы по энергосбережению являются упрощенной формой целевого обучения.

В 2014 году (328 человек) результаты итогового анкетирования слушателей показали, что 92% слушателей считают проведение курсов необходимым и актуальным для применения полученных знаний в текущей работе.

УДК 621.311

## **ЗАЖИГАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ**

Долгачев В.А., Ханефт А.В.

<sup>1</sup>Кемеровский государственный университет, Кемерово

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Томск

В последние годы возросло число публикаций, как по экспериментальному исследованию, так и по численному моделированию условий инициирования взрывчатых веществ лазерным импульсом [1-7]. Это обусловлено как развитием новых способов инициирования взрывчатых веществ, так и научным интересом с точки зрения выяснения механизма инициирования с целью направленного регулирования пороговой энергии инициирования.

Органические взрывчатые вещества обладают высокой прозрачностью на длине волны первой гармоники импульсного неодимового лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм) [8]. Вследствие этого для инициирования органических взрывчатых веществ с открытой поверхности световым импульсом в данном спектральном диапазоне необходим лазер большой мощности [9]. Обычно на практике для снижения порога зажигания образец накрывают прозрачной подложкой. Механизм снижения пороговой энергии зажигания подложкой разными авторами трактуется по-разному. Например, в работе [10] полагают, что подложка предотвращает газодинамическую разгрузку взрывчатых веществ, что и приводит к

снижению порога зажигания. Коэффициент поглощения  $\alpha$  кристаллов PETN на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм, согласно [11], порядка  $0,033 \text{ см}^{-1}$ . При плотности энергии лазерного импульса  $W \sim 15 \text{ Дж/м}^2$  нагревом ВВ при данном  $\alpha$  можно пренебречь, т.е. газодинамической разгрузки просто не может быть. В [12] экспериментально показано, что абляция подложки и оптический пробой на границе с подложкой приводят к снижению порога зажигания прозрачных для лазера на неодиме взрывчатых веществ.

Целью настоящей работы является моделирование зажигания органических взрывчатых веществ (PETN, RDX, HMX, TATB) лазерным импульсом в области прозрачности для установления рядовой зависимости порога зажигания.

### Постановка задачи

Запишем уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат с учетом плавления и многократного отражения светового потока от противоположных сторон образца:

$$\begin{aligned} \rho[c + H_f \delta(T - T_f)] \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \\ + \alpha(1 - R_1) I_0(t) \exp\left(-\alpha z - \frac{r^2}{r_0^2}\right) \times \\ \times \frac{[1 + R_2 \exp(2\alpha(z - L))]}{[1 - R_1 R_2 \exp(-2\alpha L)]} + \rho Q Z \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение (1) имеет следующие начальные и граничные условия:

$$T(r, z, 0) = T_0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $H_f$  – скрытая теплота плавления;  $\delta(T - T_f)$  – дельта функция;  $R_0$  и  $L$  – радиус и длина образца в виде цилиндра;  $T_0$  – начальная температура;  $\lambda$ ,  $c$  – коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $Q$ ,  $Z$ ,  $E$  – тепловой эффект реакции на единицу массы вещества, частотный фактор и энергия активации скорости разложения;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $r_0$  – радиус пучка;  $I_0(t)$  – плотность потока энергии в центре пучка;  $R_1$  – коэффициент отражения поверхности на входе светового пучка в образец;  $R_2$  – коэффициент отражения тыльной поверхности на выходе светового пучка из образца.

Плотность потока энергии в центре пучка задавалось выражением

$$I_0(t) = \frac{W}{6\tau_m} (4t / \tau_m)^4 \exp\left(-\frac{4t}{\tau_m}\right), \quad (3)$$

где  $\tau_m$  – длительность переднего фронта импульса, связанная с длительностью импульса, измеренного на полувывоте выражением  $\tau_i = 1.19\tau_m$ . Причем интеграл

$$\int_0^{\infty} I(t) dt = W.$$

### Результаты численных расчетов и их обсуждение

Уравнение теплопроводности решалось численно с использованием неявной разностной схемы. Разностные уравнения решались методом прогонки. Шаги по координате были переменными. Закон сохранения энергии соблюдался с точностью  $\sim 3.2\%$ . Численные расчеты проводились с использованием следующих кинетических и теплофизических параметров ВВ: РЕТН –  $E = 196,6 \text{ кДж/моль}$ ,  $Z = 6,3 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$ ,  $Q = 1,26 \text{ МДж/кг}$ ,  $\lambda = 0,25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,  $T_f = 413 \text{ К}$  [13],  $c = 1255 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  [14],  $\rho = 1,77 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  [15],  $H_f = 193 \text{ кДж/кг}$  [16]; RDX –  $E = 197,3 \text{ кДж/моль}$ ,  $Z = 2,02 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$ ,  $Q = 2,1 \text{ МДж/кг}$ ,  $\lambda = 0,105 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,  $T_f = 476 \text{ К}$  [13],  $c = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  [15],  $\rho = 1,82 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  [17],  $H_f = 235,5 \text{ кДж/кг}$  [16]; НМХ –  $E = 220,8 \text{ кДж/моль}$ ,  $Z = 5,0 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$ ,  $Q = 2,1 \text{ МДж/кг}$ ,  $\lambda = 0,293 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,  $T_f = 558 \text{ К}$  [13],  $c = 1250 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  [18],  $\rho = 1,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  [17],  $H_f = 192,46 \text{ кДж/кг}$  [19]; ТАТВ –  $E = 250,9 \text{ кДж/моль}$ ,  $Z = 3,8 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$ ,  $Q = 2,51 \text{ МДж/кг}$ ,  $\lambda = 0,418 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,  $T_f = 623 \text{ К}$  [13],  $c = 1250 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ,  $\rho = 1,93 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  [15],  $H_f = 192,46 \text{ кДж/кг}$ .

Теплоту плавления для ТАТВ оценили из эмпирической формулы

$$H_f / T_f \approx C,$$

где  $C \approx 0,43 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ . Величина  $C$  определялась путем усреднения отношений  $H_f / T_f$  для РЕТН, RDX и НМХ. Коэффициенты отражения и поглощения для всех взрывчатых веществ брались одинаковыми:  $R_1 = R_2 = 0,036$ ,  $\alpha = 0,065 \text{ см}^{-1}$ . Коэффициент  $\alpha$  в пределах разумного подбирался таким образом, чтобы описать эксперимент по инициированию РЕТН [9].

На рис. 1 представлены результаты численного решения уравнения

теплопроводности. Как видно из рис. 1, критическая энергия ( $E^* = \pi r_0^2 W^*$ ,  $r_0 = 0,25$  мм) хорошо согласуется как с экспериментом, так и с критической энергией зажигания, определяемой из критерия [20]:

$$z_1 \rho Q Z \exp\left(-\frac{E}{RT_m}\right) = \lambda \frac{\Delta T_m}{F(\gamma)} \times \left\{ \alpha \operatorname{th}\left[\alpha L - \frac{1}{2} \ln(R_2 F^2(\gamma))\right] + \frac{4z_1}{r_0^2} \right\} \quad (4)$$

$$W^* = \frac{[1 - R_1 R_2 \exp(-2\alpha L)]}{[1 + R_1 \exp(-2\alpha L)]} \left[ \frac{c\rho \Delta T_m}{\alpha(1 - R_1)} + \frac{\rho H_f}{\alpha(1 - R_1)} \right], \quad (5)$$

где

$$\gamma = RT_m / E, \quad z_1 = \alpha^{-1} \ln F(\gamma), \quad F(\gamma) = (1 + \gamma) / (1 - \gamma T_0 / \Delta T_m)$$

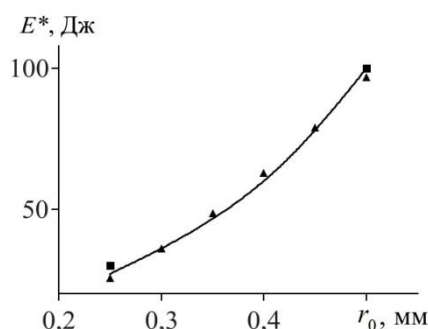


Рис. 1. Зависимость пороговой энергии инициирования PETN от радиуса светового пучка: линия – численный расчет при  $\alpha = 0,065 \text{ см}^{-1}$ , ■ – эксперимент [9], ▲ – расчет по критерию.

Относительная ошибка в определении пороговой энергии инициирования органических взрывчатых веществ лазерным импульсом по формулам (4), (5) и определенная из решения уравнения теплопроводности составила  $\sim 5,5\%$ . В таблице приведены критические плотности энергии зажигания органических взрывчатых веществ лазерным импульсом. Из таблицы видно, что наиболее чувствительным к инициированию лазерным импульсом является PETN, а наиболее термостойким является ТАТВ.

На рис. 2 приведены результаты расчета критической энергии зажигания  $E^*$  для PETN (формулы (3), (4)) в зависимости от коэффициента отражения тыльной поверхности образца. Расчеты проведены при  $r_0 = 0,25$  мм и коэффициенте отражения  $R_1 = 0,36$  (кривая 1), 0,3 (кривая 2) и 0,6 (кривая 3).

Коэффициент отражения  $R_2$  менялся от френелевского ( $R_2 = 0,036$ ) до коэффициента отражения металла ( $R_2 = 0,95$ ). Как видно из рисунка, чем больше коэффициент отражения  $R_1$ , тем в более широких пределах можно регулировать энергию зажигания  $E^*$  взрывчатых веществ лазерным импульсом, изменяя коэффициент отражения  $R_2$ .

Таблица. Критические плотности энергии зажигания ВВ лазерным импульсом.

ВВ	PETN	RDX	HMX	TATB
$W^*, 10^8$ Дж/м <sup>2</sup> (критерий)	1,26	1,34	1,63	1,96
$W^*, 10^8$ Дж/м <sup>2</sup> (расчет)	1,35	1,42	1,72	2,07

На рис. 3 (a, b, c и d) представлены результаты расчета радиального распределения температуры  $\Delta T$  в начале координат в PETN, RDX, HMX и TATB.

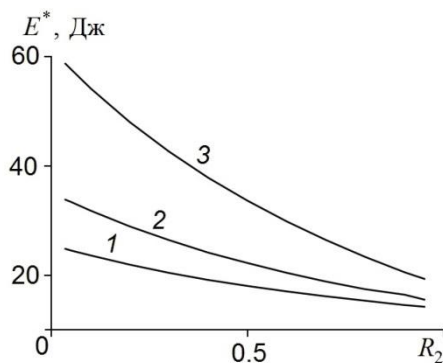


Рис. 2. Зависимость критической энергии зажигания PETN от коэффициента отражения  $R_2$  при  $R_1 = 0,036$  (1), 0,3 (2) и 0,6 (3).

Из данных наглядных картинок видно, что зажигание органических взрывчатых веществ начинается с поверхности. Таким образом, несмотря на практически незаметный градиент температуры вдоль оси  $z$ , обусловленный малостью коэффициента поглощения светового потока, нарушение теплового равновесия вследствие аррениусовской нелинейности приводит к зажиганию PETN, RDX, HMX и TATB с поверхности.

Установлена рядовая зависимость зажигания органических ВВ: PETN, RDX, HMX и TATB. Наиболее чувствительным к иницированию лазерным импульсом является PETN, а наиболее термостойким является TATB.

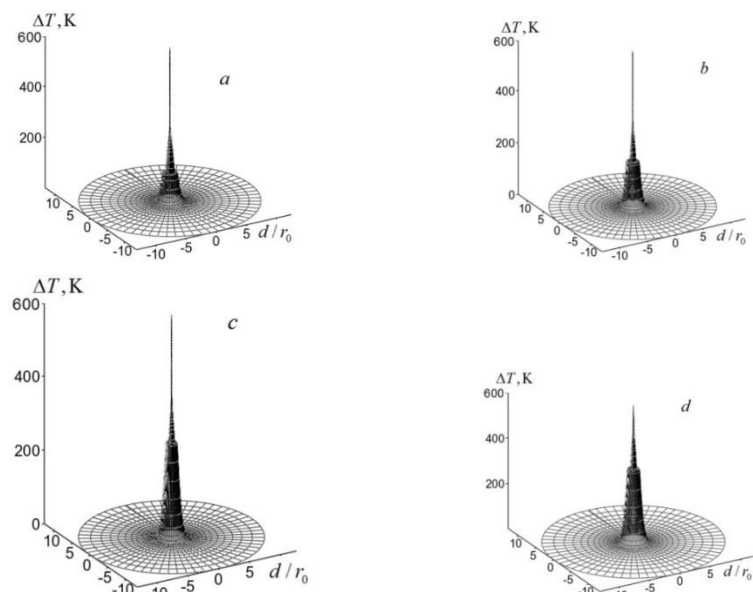


Рис. 3. Картины радиального распределения температуры  $\Delta T$  по поверхности: PETN (a) ( $W = 1,4 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup>,  $t = 5,9 \cdot 10^{-4}$  с); RDX (b) ( $W = 1,55 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup>,  $t = 2,6 \cdot 10^{-4}$  с); HMX (c) ( $W = 1,8 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup>,  $t = 5,1 \cdot 10^{-4}$  с); TATB (d) ( $W = 2,2 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup>,  $t = 5,3 \cdot 10^{-4}$  с).

Несмотря на незначительный градиент температуры вдоль оси  $z$ , нарушение теплового равновесия вследствие аррениусовской нелинейности приводит к зажиганию органических взрывчатых веществ с поверхности.

Расчеты показали, что инициирование PETN лазерным импульсом наносекундной длительности происходит по тепловому механизму.

*Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 3.1235.2014 К.*

#### Список литературы:

1. V.E. Zarco, V.N. Simonenko, P.I. Kalmykov, A.A. Kvasov, E.N. Chesnokov, K.E. Kuper, *Combust. Expl. Shock Waves* **45**, 752 (2009)
2. E.D. Aluker, N.L. Aluker, G.M. Belokurov, A.G. Krechetov, B.G. Loboiko, D.R. Nurmukhametov, A.V. Tupitsyin, V.P. Filin, *Russ. J. Phys. Chem. B* **4**, 63 (2010)
3. R.S. Burkina, V.V. Medvedev, O.V. Khrenova, *Combust. Expl. Shock Waves* **46**, 554 (2010)
4. O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, *J. Eng. Thermophys.* **19**, 85 (2010)
5. E.V. Duginov, A.V. Khanefit, *Combust. Expl. Shock Waves* **47**, 490 (2011)
6. A.V. Khanefit, E.V. Duginov, *Combust. Expl. Shock Waves* **48**, 699 (2012)
7. I.G. Assovskii, V.V. Kozynda, *Docl. Akad. Nauk* **442**, 771 (2012)
8. L.G. Strakovskii, *Combust., Expl., Shock Waves* **21**, 39 (1985)
9. A.I. Bykhalo, E.V. Zhuzhukalo, N.G. Kovalskii, A.N. Kolomiyski, V.V. Korobov, V.V., Rozhkov, A.I. Yudin, *Combust., Expl., and Shock Waves* **21**, 481 (1985)

10. V.I. Tarzhanov, A.D. Zinchenko, V.I. Sdobnov, B.B. Tokarev, A.I. Pogrebov, A.A. Volkova, *Combust., Expl., Shock Waves* **32**, 454 (1996)
11. A.M. Baranovskii, *Combust., Expl., Shock Waves* **26**, 307 (1990)
12. K. Nagayama, Y. Kotsuka, M. Nakahara, S. Kubota, S., *Sci. and Technol. of Energetic Mater* **66**, 416 (2005)
13. Физика взрыва (Наука, Москва, 2002)
14. А.В. Беляев, В.К. Боболев, А.И. Коротков, А.А. Сулимов, С.В. Чуйко, Переход горения конденсированных систем во взрыв (Наука, Москва, 1973)
15. Детонация взрывчатых веществ, сборник статей под ред. А. Борисова, (Мир, Москва, 1981)
16. Ф.А. Баум, А.С. Державец, Н.Н. Санасарян, Термостойкие взрывчатые вещества и их действие в глубоких скважинах (Недра, Москва, 1969)
17. Р. Шалл, Физика детонации, в книге “Физика высоких плотностей энергии” (Мир, Москва, 1974)
18. И.Г. Ассовский, Физика горения и внутренняя баллистика (Наука, Москва, 2005)
19. V.A. Strunin, L.I. Nikolaeva, G.B. Manelis, *Russ. J. Phys. Chem. B* **4**, 627 (2010)
20. A.V. Khanef, V.A. Dolgachev, *Combust. Expl. Shock Waves* **50**, 105 (2014)

УКД 662

## НАПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БУРЫХ УГЛЕЙ ШИВЭ-ОВООСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОНГОЛИИ

Долгих А.Ю., Кучерина А.Н.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: [cannonfodder@sibmail.com](mailto:cannonfodder@sibmail.com)

**Введение.** Большие запасы, относительная дешевизна в сравнении с другими видами топлива, такими как газ, благоприятные горно-геологические условия залегания, позволяющие осуществлять добычу наиболее экономичным путем, и уникальность физико-химических и технологических свойств ставят бурые угли на видное место в качестве топлива и технологического сырья. Однако существуют постоянно ужесточающиеся экологические требования и условия ресурсосбережения, предъявляемые к топливу. Чтобы эффективно использовать уголь необходимо вводить технологию комплексной переработки с получением различных продуктов, состоящей из трёх основных направлений: сжигание, утилизация и переработка.

**Сжигание.** Существуют три основных направления сжигания твердого топлива: слоевое, камерное и циркулирующий кипящий слой.

Исходя из характеристик угля, предлагается сжигать его в камерных топках. Это связано с возможностью эффективно сжигать топлива различной степени теплоты сгорания при относительно средней теплоте сгорания исследуемого угля.