

УДК 535.341: 544.454

## ЛАЗЕРНОЕ ЗАЖИГАНИЕ СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ БУРОГО УГЛЯ И ТЕТРАНITРОПЕНТАЭРИТРИТА

*Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Р. Ю. Ковалев, А. П. Никитин, Н. В. Нелюбина, Г. М. Белокуров*

## LASER IGNITION OF MIXED COMPOSITION OF BROWN COAL AND PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE

*B. P. Aduiev, D. R. Nurmukhametov, R. Yu. Kovalev, A. P. Nikitin, N. V. Nelyubina, G. M. Belokurov*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-03-98032 p\_сибирь\_a на оборудовании КемЦКП.*

В работе приводятся результаты измерений порогов ( $H_{cr}$ ) и кинетических характеристик зажигания смесевых составов на основе бурого угля и тетранитропентаэритрита при воздействии импульсов неодимового лазера (1064 нм, 120 мкс). Показано, что пороговые и кинетические характеристики немонотонно зависят от массового соотношения уголь-тетранитропентаэритрит.

The paper presents the results of measurements of the threshold ( $H_{cr}$ ) and kinetic characteristics of the ignition of the mixed compositions based on brown coal and pentaerythritol tetranitrate when exposed to pulses of neodymium laser (1064 nm, 120 ms). It is shown that the threshold and kinetic characteristics are monotonically dependent on the mass ratio of coal-pentaerythritol tetranitrate.

**Ключевые слова:** тэн, уголь, лазерное излучение, кинетика воспламенения, порог зажигания.

**Keywords:** PETN, coal, laser radiation, kinetics of ignition, ignition threshold.

### Введение

В настоящее время в энергетике широко применяются пылеугольные котлы. Экологичность эксплуатации определяется затратами на разжигание угольной пыли. Для снижения порога зажигания в настоящее время применяют мазут, что снижает экономические показатели. Представляет интерес поиск других способов разжигания угольной пыли без использования мазута. Например, ведется изучение и внедрение разжигания угольной пыли СВЧ-излучением [1; 2]. В настоящей работе изучена возможность лазерного зажигания бурого угля, а также возможность снижения порога зажигания за счет применения смеси угля и энергетического материала тетранитропентаэритрита (тэна).

### Образцы и методика

Использовался бурый уголь марки «Б» Кайчакского месторождения. Состав угля представлен в таблице 1.

Уголь подвергался помолу на шаровой мельнице. После помола отбиралась самая мелкая фракция угольной пыли размером  $\leq 0.1$  мм. Порошок тэна синтезировался в лаборатории и имел узкое гранулометрическое распределение с максимумом распределения 1–2 мкм. Смесевые составы приготавливались следующим образом. На аналитических весах делались навески угля и тэна, и механически перемешивались в необходимой пропорции. Далее для более равномерного перемешивания частиц смесь помещалась в гексан и перемешивалась в ультразвуковой ванне, производилась сушка смеси и навеска экспериментальных образцов. Экспериментальные образцы насыпной плотности  $\rho = 0.5$  г/см<sup>3</sup> представляли собой навески массой 10 мг,

помещенные в медный колпачок диаметром 5 мм и глубиной 2 мм массой 10 мг.

Таблица 1

### Характеристика угля марки «Б»

Технический анализ, %		
Содержание влаги ( $W^a$ )	Зольность ( $A^a$ )	Содержание летучих компонентов ( $V^{daf}$ )
8,3	10,3	48,3

Схема эксперимента представлена на рис. 1.

В качестве источника зажигания использовалась первая гармоника ( $\lambda = 1064$  нм) импульсного лазера (1) на иттрий-алюминиевом гранате активированным  $Nd^{+3}$ , работающим в режиме свободной генерации. Длительность импульса составляла 120 мкс, максимальная энергия в импульсе 0.5 Дж. Регулирование энергии лазерного излучения осуществлялось с помощью набора стеклянных светофильтров (2) с известными коэффициентами ослабления излучения. Для контроля энергии лазерного излучения часть энергии излучения (8 %) отводилось прозрачной стеклянной пластиной (3) на пироэлектрический приемник OPHIRPESOBFC-C (4). При помощи поворотного зеркала (5) лазерное излучение направлялось через фокусирующую линзу (6) с фокусным расстоянием 25 см на образец (7), находящийся на основании (8). Диаметр лазерного пятна, падающего на образец, составлял 2.5 мм. Свечение, возникающее при воздействии импульса излучения на образец, фиксировалось фотоэлектронным умножителем Hamamatsu H10721-01 (9), преобразовывалось в электрический сигнал и регистрировалось осциллографом LeCroy WY332A (10).

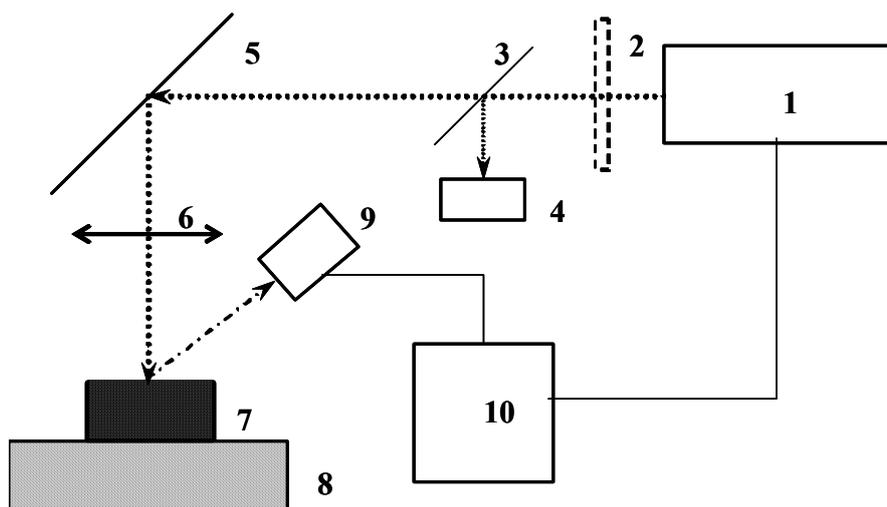


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – лазер; 2 – нейтральные светофильтры; 3 – светоделительная пластинка; 4 – пироэлектрический приемник; 5 – поворотное зеркало; 6 – линза; 7 – образец; 8 – основание; 9 – фотоэлектронный умножитель; 10 – осциллограф

**Результаты и обсуждения**

Исследовались кинетика свечения и пороги зажигания смесей бурого угля и тэна в соотношениях от 0 до 99.5 масс. %. Десять образцов последовательно облучались одиночным импульсом лазера определенной энергии, регистрировалась кинетика свечения с помощью фотоумножителя. За вероятность зажигания смеси  $p$  принималось отношение зарегистрированных сигналов фотоумножителя к общему числу образцов. Далее увеличивалась энергия лазерного импульса и эксперимент повторялся. Таким образом, измерялась вероятность появления вспышки в зависимости от плотности энергии лазера (кривые частоты). Эксперименты повторялись для различных составов энергетических смесей. За порог зажигания принимали плотность энергии  $H_{cr}$ , соответствующую 50 % вероятности вспышки. Пороги зажигания, в зависимости от состава смеси, представлены на рис. 2.

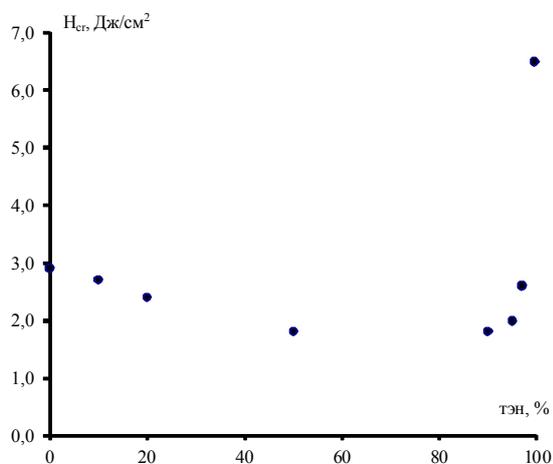


Рис. 2. Зависимость порога зажигания угля от массового содержания тэна при импульсном лазерном воздействии

Отметим, что для порошка угля без добавок тэна  $H_{cr} = 2.9$  Дж/см<sup>2</sup>. Порошок тэна без добавок угля не зажигается при максимальных возможных использованных энергиях 10 Дж/см<sup>2</sup>. Отчетливое снижение порога зажигания наблюдается при увеличении содержания тэна 0 – 50 % по массе. В интервале 50 – 90 % содержания тэна в порошке порог зажигания слабо зависит от плотности энергии лазерного излучения, при увеличении содержания тэна от 90 – 99.5 % наблюдается резкое возрастание  $H_{cr}$ .

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Известно, что чистый порошок тэна практически прозрачный длине волны 1064 нм [3]. Лазерное излучение поглощается частицами угля. В результате их нагрева до температуры вспышки тэна  $T \approx 215^\circ\text{C}$  [4] и экзотермической реакции загораются частицы тэна и поджигают окружающие частицы угля. Это приводит к снижению порога зажигания смеси в интервале 0 – 50 % содержанию тэна. При дальнейшем увеличении содержания тэна, вследствие уменьшения содержания поглощающих частиц угля  $H_{cr}$  сначала слабо зависит от состава, а при содержании поглощающих частиц угля < 10 % по массе начинает резко возрастать. Некоторые кинетики свечения, возникающие при горении смесей, представлены на рис. 3.

Длительность вспышки немонотонно зависит от состава смесей. Для наглядности на рис. 4 представлена зависимость момента времени, соответствующего максимальной интенсивности вспышки от состава смеси.

Сравнение рис. 2 и 4 показывает, что длительность вспышки снижается по мере снижения  $H_{cr}$  и резко возрастает при содержании тэна выше 90 %. Приведенные модельные эксперименты позволяют сделать вывод, что использование смесевых составов энергетических материалов и углей с применением лазерного зажигания открывает перспективу для разработки новых способов разжигания топлива в пылеугольных котлах.

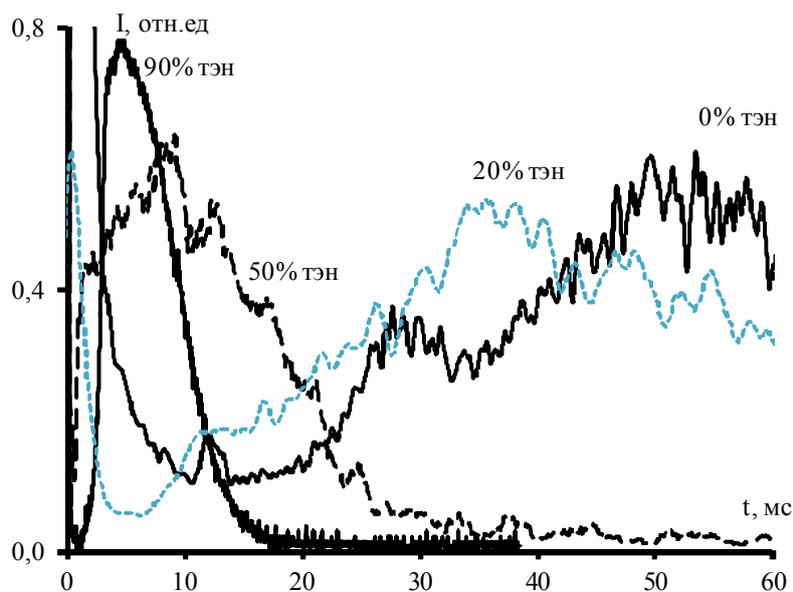


Рис. 3. Кинетика интенсивности свечения, возникающего при горении смеси с различным содержанием тэна в угле

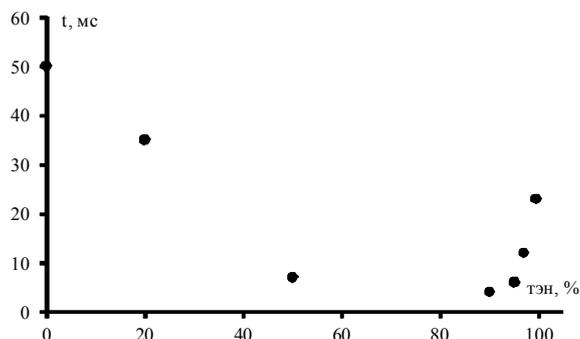


Рис. 4. Зависимость момента времени достижения максимальной интенсивности свечения горения от содержания тэна в угле

#### Литература

1. Жуков М. Ф., Карпенко Е. И., Перегудов В. С. [и др.]. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела. Новосибирск: Наука, 1995. 304 с.
2. Казанцев В. И., Капило П. М. [и др.]. Исследование СВЧ-плазменной технологии сжигания низкосортных углей // Теплоэнергетика. 2002. № 12. С. 39 – 44.
3. Aluker E. D., Krechetov A. G., Mitrofanov A. Y., Nurmukhametov D. R., Kuklja M. M. Laser Initiation of Energetic Materials: Selective Photoinitiation Regime in Pentaerythritol Tetranitrate // J. Phys. Chem. C. 2011. V. 115. № 14. P. 6893 – 6901.
4. Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л.: Химия, 1981.

#### Информация об авторах:

**Адуев Борис Петрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией энергетических соединений и наноклапозитов ИУХМ СО РАН, профессор кафедры теоретической физики КемГУ, lesinko-iuxm@yandex.ru.

**Boris P. Aduev** – Doctor of Physics and Mathematics, Full Professor, Head of the Laboratory of Energetic Compounds and Nanocomposites, Institute of Coal Chemistry and Materials Science of SB RAS, Professor at the Department of Theoretical Physics, Kemerovo State University.

**Нурмухаметов Денис Рамильевич** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории энергетических соединений и наноклапозитов ИУХМ СО РАН, старший преподаватель кафедры теоретической физики КемГУ, lesinko-iuxm@yandex.ru.

**Denis R. Nurmukhametov** – Candidate of Physics and Mathematics, Research Associate at the Laboratory of Energetic Compounds and Nanocomposites, Institute of Coal Chemistry and Materials Science of SB RAS, Senior Lecturer at the Department of Theoretical Physics, Kemerovo State University.

**Ковалёв Родион Юрьевич** – аспирант, инженер лаборатории энергетических соединений и нанокластеров ИУХМ СО РАН, lesinko-iuxm@yandex.ru.

**Rodion Yu. Kovalev** – post-graduate student, engineer the Laboratory of Energetic Compounds and Nanocomposites, Institute of Coal Chemistry and Materials Science of SB RAS.

(Научный руководитель – **Б. П. Адуев**). (Academic advisor – **B. P. Aduev**).

**Никитин Андрей Павлович** – аспирант, инженер лаборатории энергетических соединений и нанокластеров ИУХМ СО РАН, инженер кафедры химии твердого тела КемГУ, lesinko-iuxm@yandex.ru.

**Andrey P. Nikitin** – post-graduate student, engineer the Laboratory of Energetic Compounds and Nanocomposites, Institute of Coal Chemistry and Materials Science of SB RAS, engineer at the Department of Chemistry of Solids, Kemerovo State University.

(Научный руководитель – **Б. П. Адуев**). (Academic advisor – **B. P. Aduev**).

**Нелюбина Наталья Васильевна** – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории энергетических соединений и нанокластеров ИУХМ СО РАН, lesinko-iuxm@yandex.ru.

**Natalia V. Nelyubina** – Candidate of Chemistry Sciences, Research Associate at the Laboratory of Energetic Compounds and Nanocomposites, Institute of Coal Chemistry and Materials Science of SB RAS.

**Белокуров Геннадий Михайлович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетических соединений и нанокластеров ИУХМ СО РАН, lesinko-iuxm@yandex.ru.

**Gennadiy M. Belokurov** – Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Associate at the Laboratory of Energetic Compounds and Nanocomposites, Institute of Coal Chemistry and Materials Science of SB RAS.

Статья поступила в редколлегию 21.09.2015 г.