

УДК 544.452.1, 520.843.054

DOI: 10.15372/ChUR2020260

Энергетические характеристики зажигания и кинетика свечения пламен дисперсных частиц углей различных стадий метаморфизма при воздействии лазерных импульсов

Б. П. АДУЕВ¹, Д. Р. НУРМУХАМЕТОВ¹, Я. В. КРАФТ¹, З. Р. ИСМАГИЛОВ^{1,2}¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
Кемерово (Россия)

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

²Институт катализа СО РАН,
Новосибирск (Россия)

Аннотация

Исследовано лазерное зажигание (1064 нм, 120 мкс) мелкодисперсных частиц углей марок Б, Д, ДГ, Г, Ж, К, ОС, СС, Т, А. Для углей всех марок обнаружены три последовательные стадии зажигания с характерными пороговыми плотностями энергии излучения (H_{cr}) для каждой стадии. С увеличением степени углефикации значения первого порога зажигания $H_{cr}^{(1)}$ практически не меняются, второго порога зажигания $H_{cr}^{(2)}$ снижаются, а третьего порога зажигания $H_{cr}^{(3)}$ возрастают. Приведены результаты исследования кинетических зависимостей свечения пламен на различных стадиях зажигания, возникающих при воздействии лазерных импульсов на частицы угля. Длительность свечения на первой стадии зажигания незначительно превышает длительность лазерного импульса и достигает 150 мкс для всех марок углей. На второй стадии зажигания при плотности энергии лазерного излучения (H), равной $H_{cr}^{(2)}$, длительность свечения находится в миллисекундном временном интервале, а с ростом H она уменьшается до субмиллисекундного диапазона в результате увеличения скорости термохимических реакций. На третьей стадии зажигания при $H = H_{cr}^{(3)}$ длительность свечения составляет порядка 10–100 мс для различных марок углей. Установлено, что для исследованных марок углей интенсивность свечения нарастает с момента воздействия лазерного импульса. В субмиллисекундном диапазоне наблюдается спад интенсивности свечения. Амплитуда свечения углей линейно возрастает с увеличением параметра H .

Ключевые слова: уголь, лазерное зажигание, горение, кинетические зависимости свечения, пороги зажигания, стадии зажигания

ВВЕДЕНИЕ

Разработка физических методов зажигания пылеугольного топлива открывает перспективы для безмазутного розжига углей в промышленных топках, что обеспечит значительный экономический и экологический эффект. В частности, уже существуют разработки на основе плазмотронов, применяемых для этих целей [1–3]. Исследования лазерного зажигания дисперсных

частиц углей перспективны для создания новых систем розжига пылеугольного топлива. Одна из возможных принципиальных схем системы лазерного розжига следующая. В режиме растопки пылеугольное топливо подается на растопочные муфельные горелки, в которых в качестве запального устройства используется высокоэффективный твердотельный лазер, при этом основные горелки котла отключаются. Как предполагается, лазерные системы розжига об-

ладают рядом преимуществ по сравнению с разработками на основе плазмотронов: меньшее энергопотребление, техническая простота систем, отсутствие часто меняемых расходных комплектующих (сопла и катоды для плазмотрона). Для создания систем лазерного розжига пылеугольного топлива в промышленных топках необходимы фундаментальные исследования процессов, протекающих на начальных стадиях зажигания углей. Такие исследования начаты в [4–9] и продолжены в настоящей работе. Кроме того, это направление важно для совершенствования технологий интенсификации горения твердых органических топлив, а также представляет интерес для разработки методов предотвращения взрывов угольной пыли в шахтах. Использование импульсного лазерного излучения для инициирования термохимических процессов зажигания углей отличается простотой подвода энергии к частицам угля и возможностью контроля за процессами на различных стадиях зажигания с помощью электронно-оптического метода [4, 5] и метода оптической спектроскопии с высоким временным разрешением [6].

Детального изучения пороговых энергетических и спектрально-кинетических характеристик свечения пламен мелкодисперсных частиц углей в ряду метаморфизма до настоящего времени не проводилось. Ранее нами определены пороговые характеристики лазерного зажигания углей марок Б, ДГ, Г, Ж, К, измерены кинетические зависимости свечения пламен на соответствующих пороговых энергиях [5, 6]. Настоящая работа является продолжением этих исследований с расширением набора образцов углей и обобщением обнаруженных закономерностей в ряду метаморфизма от бурого угля до антрацита.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Объектами исследования служили угли Кузнецкого угольного бассейна следующих марок: Б (разрез Кайчакский), Д (разрез Камышанский, Северо-Талдинское месторождение, пласт 73), ДГ (шахта им. В. Д. Ялевского, пласт 52), Г (шахта им. Кирова, пласт Поленовский), Ж (шахта Тихова, пласт 23), К (ООО “Участок Коксовый”, пласт II внутренний), ОС (разрез Томусинский), СС (разрез Бачатский), Т (АО “Кузнецкининвестстрой”, пласт 19а), А (разрез Бунгурский). Образцы углей получены из банка углей Институ-

та углехимии и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН.

Для подготовки экспериментальных образцов крупные куски угля каждой марки подвергались размолу на шаровой мельнице Pulverisette 6 (Fritsch, Германия). После измельчения частицы угля просеивались через вибрационное сито с размером ячеек 63 мкм.

По стандартным методикам определены показатели технического анализа углей. Влага в аналитической пробе угля (W^a) вычислена как потеря массы навески угля при нагревании в сушильном шкафу при 378–383 К до постоянной массы (ГОСТ Р 52917–2008); зольность (A^d) – как масса остатка навески угля, измеренная после сжигания навески в муфельной печи при температуре 1078–1100 К (ГОСТ 11022–95), результаты A^d приводятся на сухое состояние навески угля. Выход летучих веществ (V^{daf}) рассчитан как потеря массы навески угля при нагревании без доступа воздуха до 1173 К в течение 7 мин за вычетом потери массы, обусловленной влажностью пробы (ГОСТ 6382–2001), результаты V^{daf} приводятся на сухое беззольное состояние навески угля.

Результаты технического анализа аналитических проб углей приведены в табл. 1.

Элементный состав образцов углей определен с помощью автоматического элементного анализатора содержания С, Н, N, S, O Flash 2000 (Thermo Fisher Scientific, Великобритания). Результаты анализа, рассчитанные на органическую массу угля (ОМУ), представлены в табл. 2.

Экспериментальные образцы с насыпной плотностью $\rho = 0.5 \text{ г/см}^3$ в виде навески массой 10 мг помещались в медный капсюль диаметром 5 мм и глубиной 2 мм.

Методика исследования

Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

В качестве источника лазерного излучения использовали импульсный YAG:Nd³⁺-лазер (Л), работающий в режиме свободной генерации (длина волны $\lambda = 1064 \text{ нм}$). Длительность импульса составляла 120 мкс; диаметр падающего на образец лазерного пятна – 2.5 мм. Нестабильность энергии импульса лазера не превышала 2 %. Распределение интенсивности излучения по сечению пучка – квазипрямоугольное.

Регулирование энергии лазерного излучения осуществлялось с помощью набора стеклянных

ТАБЛИЦА 1

Результаты технического анализа аналитических проб углей

Номер образца	Номер пробы, марка угля, место добычи	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %
1	27, Б, разрез Кайчакский	11.8	10.1	53.1
2	72, Д, разрез Камышанский, Северо-Талдинское месторождение, пласт 73	7.6	6.2	44.5
3	64, ДГ, шахта им. В. Д. Ялевского, пласт 52	5.7	4.7	42.6
4	40, Г, шахта им. Кирова, пласт Поленовский	1.2	3.3	40.4
5	15, Ж, шахта Тихова, пласт 23	0.8	7.8	33.3
6	10, К, ООО "Участок Коксовый", пласт II внутренний	0.6	4.9	21.3
7	34, ОС, разрез Томусинский	0.1	6.7	19.8
8	45, СС, разрез Бачатский	1.3	4.7	19.0
9	81, Т, АО "Кузнецкивестстрой", пласт 19а	0.5	6.2	14.4
10	33, А, разрез Бунгурский	0.4	3.6	7.7

Примечание. W^a – влага аналитическая, A^d – зольность, V^{daf} – выход летучих веществ.

ТАБЛИЦА 2

Результаты элементного анализа углей

Номер образца	Номер пробы, марка угля	Содержание, %				
		С	Н	N	S	O (по разности)
1	27, Б	61.4	5.1	1.0	0.5	31.9
2	72, Д	74.4	5.3	2.3	0.5	17.5
3	64, ДГ	74.3	5.3	2.3	0.3	17.7
4	40, Г	81.3	5.8	3.1	0.2	9.6
5	15, Ж	80.2	5.2	3.0	0.4	11.2
6	10, К	87.7	4.6	2.2	0.4	5.1
7	34, ОС	84.8	4.2	2.0	0.3	8.7
8	45, СС	83.8	4.0	2.1	0.1	10.0
9	81, Т	89.7	4.1	2.0	0.4	3.8
10	33, А	89.6	3.3	1.8	0.4	4.9

светофильтров (1) с известными коэффициентами ослабления излучения. Для контроля энергии часть излучения (8 %) отводилась светоделительной пластиной (2) на пироэлектрический приемник PE50BF-C (Ophir Photonics, Израиль) (ПП). Лазерное излучение с помощью фокусирующей линзы (3) с фокусным расстоянием 25 см и поворотного зеркала (4) направлялось на образец угля (5), находящийся на массивном основании (6). Возникающее под воздействием импульса свечение образца фиксировалось фотоэлектронным умножителем Н-10721-01 (Hamamatsu, Япония, временное разрешение 0.5 нс) (ФЭУ), преобразовывалось в электрический сигнал и регистрировалось осциллографом WJ332A (LeCroy, США) (7).

Для определения пороговых характеристик зажигания углей последовательно облучали десять образцов единичным импульсом лазера

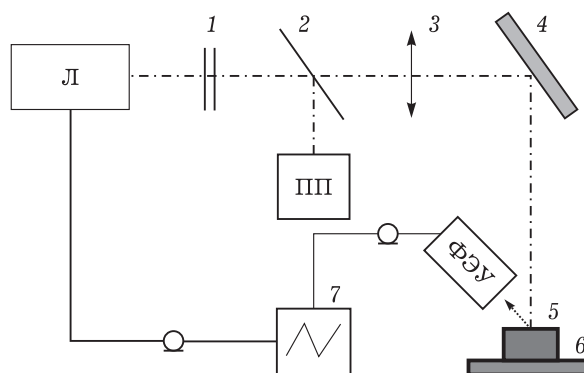


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки: 1 – нейтральные светофильтры; 2 – светоделительная пластина; 3 – линза; 4 – поворотное зеркало; 5 – образец; 6 – массивное основание; 7 – осциллограф; Л – импульсный YAG:Nd³⁺-лазер (1064 нм, 120 мкс); ПП – пироэлектрический приемник; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель.

определенной энергии и регистрировали кинетические зависимости свечения углей с помощью фотоумножителя.

Вероятность зажигания (P) определялась как $P = n/10$ (1)

где n – число зарегистрированных вспышек.

Далее энергия излучения увеличивалась и эксперимент повторялся. В итоге получена зависимость вероятности появления вспышки от плотности энергии излучения лазера для образцов всех указанных марок угля.

Экспериментальные результаты аппроксимировались интегралом вероятности:

$$p(H) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^H \exp\left(-\frac{(t - H_{cr})^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (2)$$

где H – плотность энергии лазерного излучения; H_{cr} – плотность энергии, соответствующая 50 % вероятности появления вспышки (порог зажигания); σ – среднеквадратичное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для образцов всех исследованных марок углей обнаружено три стадии зажигания, которые характеризуются определенными пороговыми значениями H_{cr} и длительностями свечения (t , мс).

В качестве примера на врезках (рис. 2) приведены зависимости вероятности зажигания угля марки Д от плотности энергии лазерного излучения (кривые частоты). Видно, что можно выделить три порога зажигания H_{cr} , соответствующих различным процессам в образцах.

Также на рис. 2 представлены зарегистрированные фотоумножителем кинетические зависимости интенсивности свечения (I , В) пламени угля марки Д при вероятности $P = 0.5$ для трех вышеуказанных процессов.

Значения порогов зажигания H_{cr} для всех исследованных марок углей приведены в табл. 3.

На рис. 3 показаны зависимости порогов зажигания H_{cr} от степени углефикации исследованных углей.

Погрешности измерений величин H_{cr} (см. табл. 3) и доверительных интервалов (см. рис. 3) соответствуют значениям среднеквадратичного отклонения σ при аппроксимации кривых частоты формулой (2).

Видно, что с увеличением степени углефикации значения $H_{cr}^{(1)}$ остаются практически постоянными, но имеют значительный статистический разброс (см. рис. 3, а), значения $H_{cr}^{(2)}$ уменьшаются (см. рис. 3, б), а $H_{cr}^{(3)}$ увеличиваются (см. рис. 3, в).

В серии экспериментов исследовано влияние плотности энергии лазера на кинетические зависимости свечения пламен образцов углей для трех обнаруженных стадий зажигания.

Кинетические зависимости свечения на первой стадии зажигания для исследованных марок углей имеют одинаковый характер. Длительность свечения незначительно превышает длительность лазерного импульса и достигает 150 мкс в диапазоне плотности энергии от $H_{cr}^{(1)}$ до $H_{cr}^{(2)}$ (см. рис. 2, а).

Для кинетических зависимостей свечения на второй стадии зажигания качественно прослеживается аналогичный характер. В интервале плотностей энергии от $\sim H_{cr}^{(2)}$ до $(2-3)H_{cr}^{(2)}$ для таких зависимостей наблюдается уменьшение длительности свечения. В качестве примера на рис. 4. приведены кинетические зависимости свечения на второй стадии зажигания для углей марок Д и Т.

При достаточно высоких плотностях энергии лазерного излучения длительность свечения уменьшается до субмиллисекундного временного интервала. Так, на рис. 5 показаны кинетические зависимости свечения для угля марки Т, измеренные при различных плотностях энергии. Максимум интенсивности свечения достигается за время $t = 110$ мкс при всех использованных плотностях энергии. Качественно аналогичные зависимости наблюдаются для всех исследованных углей.

Зависимости амплитуды интенсивности свечения в момент времени $t = 110$ мкс от плотности энергии излучения для образцов пяти марок углей представлены на рис. 6.

Измерение кинетических зависимостей свечения пламени углей, соответствующих плотностям энергии $H \geq H_{cr}^{(3)}$ показало, что длительность свечения на третьей стадии зажигания практически не зависит от плотности энергии лазерного излучения. Отмечено, что максимальная величина плотности энергии составляла 15 Дж/см². Однако форма импульса изменяется даже при фиксированной плотности энергии.

В наших предыдущих работах [4–6] стадийность зажигания и зависимости пороговых значений зажигания $H_{cr}^{(i)}$ от степени углефикации мы связали с протеканием следующих термохимических процессов.

На первой стадии зажигания происходит нагрев поверхности частиц углей и зажигание микровыступов. Вторая стадия зажигания связана с выходом и зажиганием летучих веществ в газовой фазе, а третья стадия – с зажиганием неле-

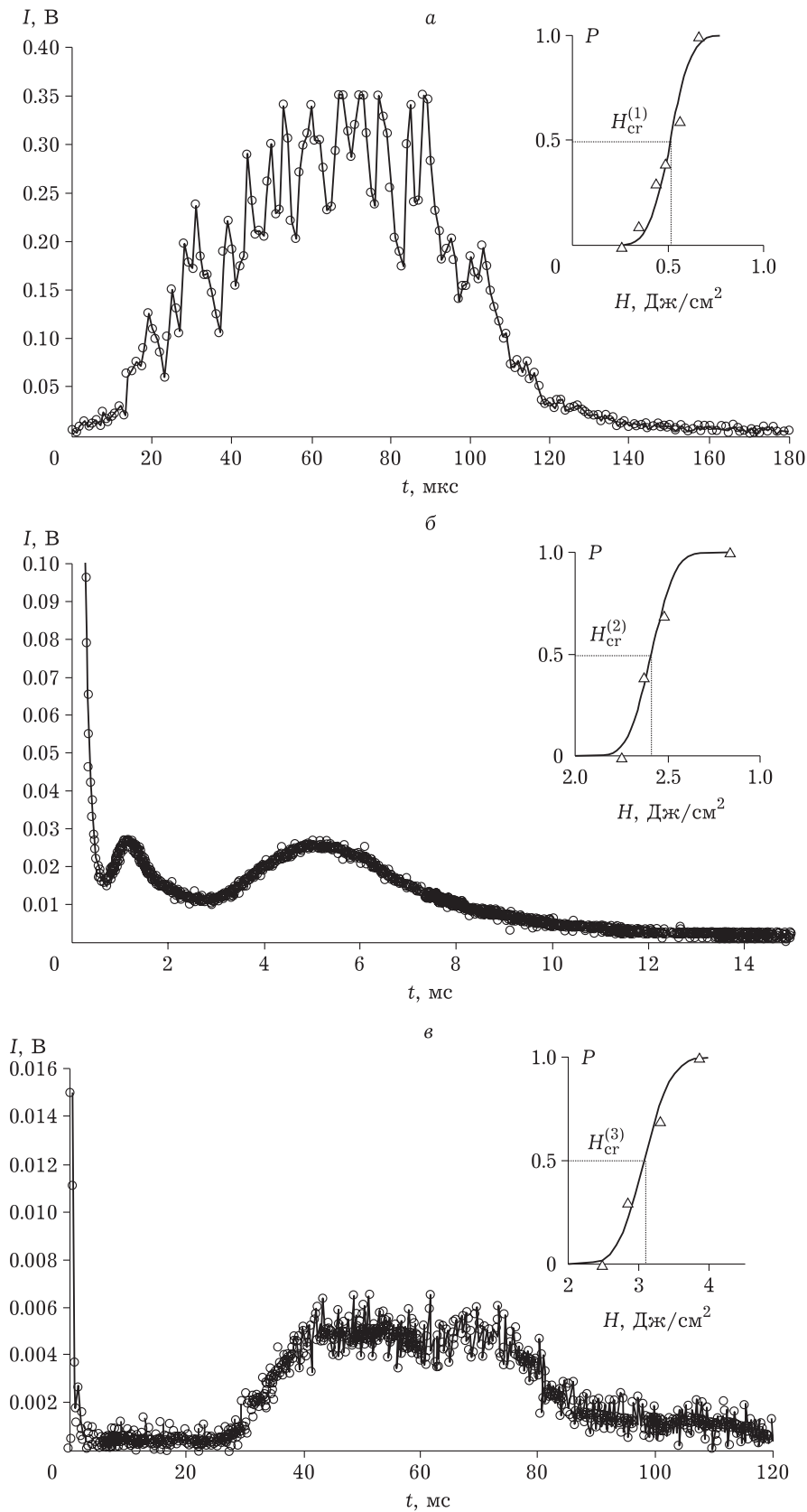


Рис. 2. Кинетические зависимости интенсивности свечения (I , В) пламен угля марки Д при вероятности $P = 0.5$ для трех стадий зажигания: $H_{cr}^{(1)} = 0.51$ Дж/см² (*a*), $H_{cr}^{(2)} = 2.41$ Дж/см² (*б*), $H_{cr}^{(3)} = 3.08$ Дж/см² (*в*). На вставках: зависимости вероятности (P) зажигания угля марки Д от плотности энергии лазерного излучения (H).

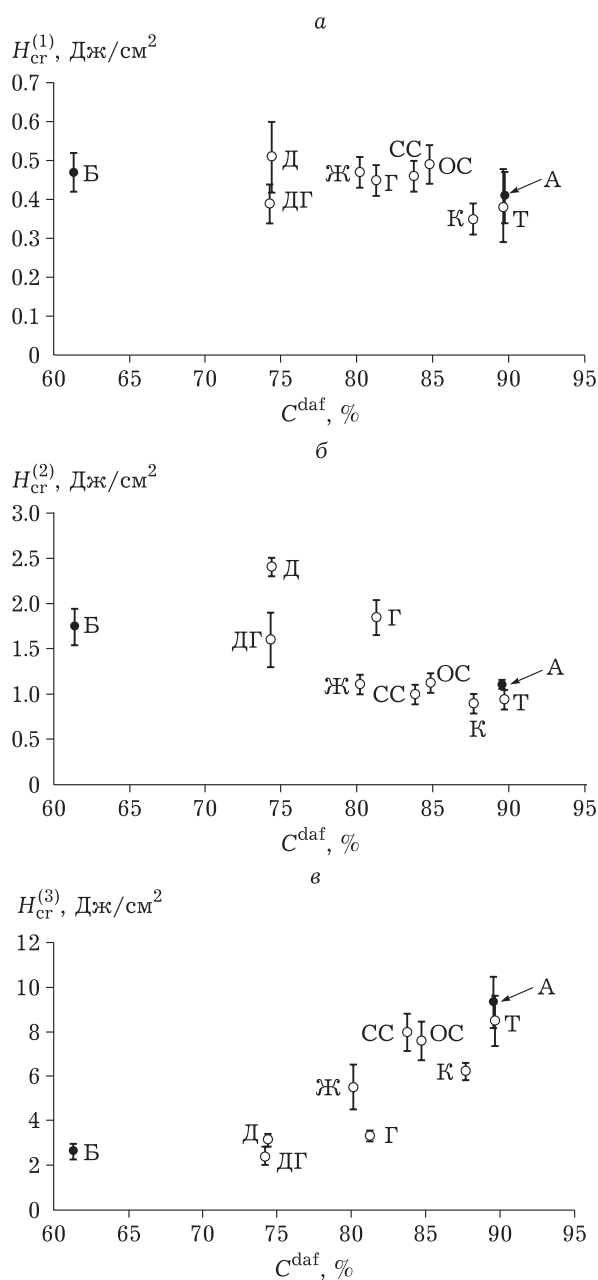


Рис. 3. Зависимости порогов зажигания $H_{cr}^{(1)}$ (а), $H_{cr}^{(2)}$ (б), $H_{cr}^{(3)}$ (в) от степени углефикации (C^{daf} , %) исследованных углей.

ТАБЛИЦА 3

Значения порогов зажигания H_{cr} исследованных образцов углей

Номер образца	Номер пробы, марка угля	$H_{cr}^{(1)}$, Дж/см ²	$H_{cr}^{(2)}$, Дж/см ²	$H_{cr}^{(3)}$, Дж/см ²
1	27, Б	0.47±0.05	1.7±0.2	2.6±0.3
2	72, Д	0.51±0.09	2.4±0.1	3.1±0.3
3	64, ДГ	0.39±0.05	1.6±0.3	2.4±0.4
4	40, Г	0.45±0.04	1.8±0.2	3.3±0.2
5	15, Ж	0.47±0.04	1.1±0.1	5.5±1.0
6	10, К	0.35±0.04	0.9±0.1	6.2±0.4
7	34, ОС	0.49±0.05	1.1±0.1	7.5±0.8
8	45, СС	0.46±0.04	1.0±0.1	7.9±0.8
9	81, Т	0.38±0.09	0.9±0.1	8.5±1.1
10	33, А	0.41±0.07	1.10±0.05	9.3±1.1

тучего остатка частиц углей. В пользу этих выводов свидетельствуют данные [10] и результаты наших экспериментов [4–6].

В [10] показано, что зажигание частицы каменного угля при воздействии лазерного излучения инициируется на микровыступах. Обнаружена зависимость времени воспламенения частицы угля и минимальной интенсивности лазерного излучения, необходимой для ее воспламенения, от количества неоднородностей на поверхности частицы угля [10]. Таким образом, процесс зажигания микровыступов связан с размерами частиц и геометрией их поверхностей, которые имеют значительный статистический разброс и в результате дают измеряемые в эксперименте значения $H_{cr}^{(1)}$. Напомним, что в данной работе использовались образцы углей с размером частиц менее 63 мкм. Возможно, именно процесс зажигания микровыступов дает определяющий вклад в $H_{cr}^{(1)}$ и приводит к слабой зависимости (либо к ее отсутствию) от степени углефикации исследованных углей. Кроме того, как показали электронно-оптические исследования, использованные образцы углей имеют широкое распределение по размерам со значительным количеством частиц ~1 мкм. Поэтому, помимо микровыступов на частицах относительно больших размеров, первую стадию зажигания также инициирует процесс зажигания частиц углей с размерами ~1 мкм.

Для объяснения зависимостей второго $H_{cr}^{(2)}$ и третьего $H_{cr}^{(3)}$ порогов зажигания углей от степени углефикации на данном этапе исследований, как и в [4–6], предлагается следующая модель.

Инициирование химических реакций связано с поглощением энергии лазерного излучения. С увеличением степени углефикации возрастает показатель поглощения углей (k) [11]. Температура лазерного зажигания углей (T_3) в ряду ме-

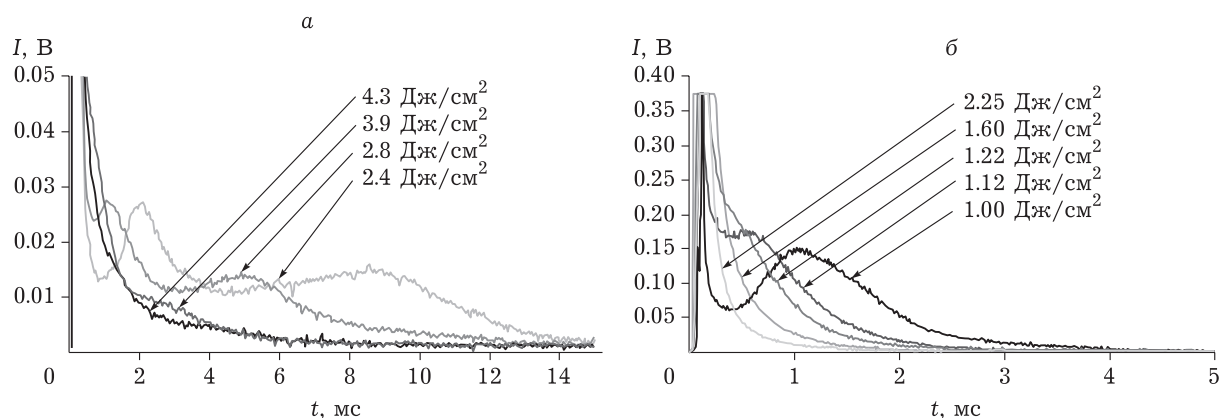


Рис. 4. Кинетические зависимости свечения углей марок Д (а) и Т (б) на второй стадии зажигания при воздействии лазерными импульсами с плотностью энергии $H > H_{cr}^{(2)}$.

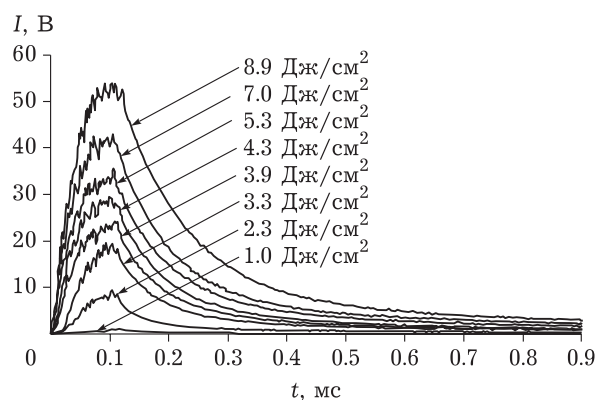


Рис. 5. Кинетические зависимости свечения в субмиллисекундном временном интервале для угля марки Т, измеренные при различных плотностях энергии лазерного излучения.

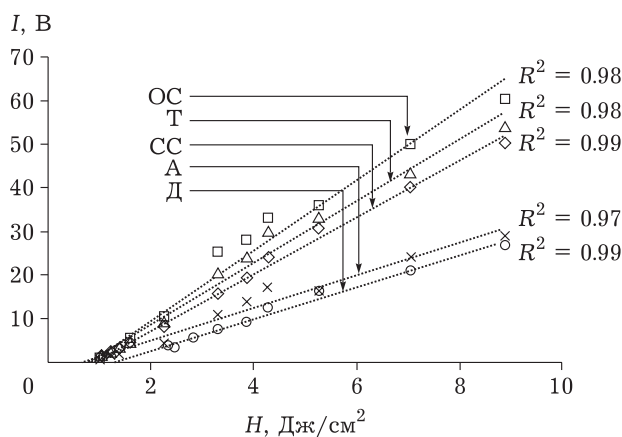


Рис. 6. Зависимости амплитуды интенсивности свечения от плотности энергии излучения для марок угля ОС, Т, СС, А, Д (длительность свечения $t = 110$ мкс).

таморфизма практически постоянна [12]. Удельная теплоемкость (c) исследуемых углей изменяется незначительно, например, при температуре 300 К истинная теплоемкость рядового угля марки Д составляет $c \sim 1.11$ кДж/(кг · К), а марки А – $c \sim 0.83$ кДж/(кг · К) [13]. Также в малом диапазоне варьируется истинная плотность исследуемых углей: для угля марки Д истинная плотность $\rho_{ист} \sim 1.40$ г/см³, а для угля марки А – $\rho_{ист} \sim 1.32$ г/см³ [14]. Таким образом, при зажигании различных углей для достижения T_3 объемная плотность поглощенной энергии (Q_v) изменяется слабо.

$$c\rho\Delta T = Q_v \quad (3)$$

С другой стороны,

$$Q_v = Hk \quad (4)$$

Отсюда следует, что с увеличением степени углефикации и показателя поглощения k уменьшается $H_{cr}^{(2)}$.

На третьей стадии зажигания с увеличением степени углефикации наблюдается возрастание $H_{cr}^{(3)}$. Таким образом, качественно прослеживается противоположная второй стадии зажигания зависимость. На третьей стадии зажигания нагрев частиц угля до T_3 осуществляется в результате действия двух факторов: 1) нагрев за счет поглощения энергии лазерного импульса; 2) нагрев частиц углей в результате сгорания газовой фазы. С увеличением степени углефикации уменьшается масса сгоревших летучих веществ, что, соответственно, приводит к относительно меньшему нагреву частиц углей. Для достижения T_3 требуется увеличение энергии лазерного импульса, что и приводит к наблюдаемой зависимости $H_{cr}^{(3)}$ от степени углефикации.

Для полученных зависимостей пороговых значений $H_{cr}^{(2)}$ и $H_{cr}^{(3)}$ от степени углефикации мож-

но предложить следующее объяснение. Известно, что молекула угля состоит из ароматических колец углерода, которые соединяются друг с другом с помощью алифатических линейных цепочек. Линейные алифатические цепи связаны также с радикалами и образуют более реакционноспособную периферийную часть молекулярной структуры угля [15]. Ядро молекулы обладает наибольшей прочностью связей и термостойкостью, боковые алифатические группы различной степени полимеризации характеризуются сравнительно меньшей устойчивостью. Поэтому на втором этапе при плотностях энергии $H_{cr}^{(2)}$ происходит разрушение алифатических цепочек. В спектрах пламени наблюдается свечение возбужденных молекул H_2 , H_2O и углеродных частиц [6]. С увеличением степени углефикации возрастает количество ароматического углерода, а алифатического – уменьшается. При этом небольшое снижение $H_{cr}^{(2)}$ может быть связано с индивидуальным строением молекул углей либо, как предложено выше, с ростом показателя поглощения k .

Далее можно предположить, что третий этап, протекающий при более высоких плотностях энергии, связан с разрушением термически стойких ароматических ядер молекул с последующим зажиганием при $H_{cr}^{(3)}$. С этой точки зрения понятен рост $H_{cr}^{(3)}$ с увеличением степени углефикации, поскольку степень ароматичности в ряду метаморфизма возрастает.

Тогда наблюдаемые кинетические зависимости свечения на второй стадии зажигания в миллисекундном временном интервале можно объяснить следующим образом. С ростом плотности энергии излучения $H > H_{cr}^{(2)}$ увеличивается нагрев угля, в результате чего возрастает скорость термохимических реакций в алифатических цепочках. Это приводит к распаду последних, выходу и воспламенению летучих веществ, а также воспламенению углеродных частиц.

Измерения свечения пламен углей в субмиллисекундном временном интервале (см. рис. 5) показали, что при $H > H_{cr}^{(3)}$ наблюдается зажигание частиц углей непосредственно во время импульса облучения. При этом интенсивность свечения пламени линейно возрастает с увеличением плотности энергии лазерного излучения. Затухание излучения в субмиллисекундном интервале не описывается экспоненциальным законом. Время затухания (уменьшения интенсивности до значения, соответствующего половине амплитуды) увеличивается в интервале

$\Delta t = 29\text{--}130$ мкс при увеличении плотности энергии в диапазоне $\Delta H = 1.0\text{--}8.9$ Дж/см².

Наблюдаемая зависимость интенсивности свечения от плотности энергии (см. рис. 6) свидетельствует о том, что во время лазерных импульсов в используемом диапазоне мощностей отсутствуют процессы, связанные с оптическим пробоем, цепными реакциями и т. д., которые привели бы к нелинейной зависимости интенсивности свечения пламени от плотности энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При лазерном зажигании мелкодисперсных частиц (размером менее 63 мкм) углей различных марок выделено три стадии зажигания, имеющие пороговый характер. Первая стадия зажигания связана с нагревом поверхности крупных частиц углей и зажиганием микровыступов наряду с зажиганием частиц углей размером ~1 мкм, присутствующих в образце. Вторая стадия зажигания характеризуется выходом и воспламенением летучих веществ, а также воспламенением углеродных частиц, которые, наиболее вероятно, возникают при разрушении алифатических цепочек. На третьей стадии зажигания происходят термохимические реакции в ароматической части макромолекулы угля, приводящие к зажиганию нелетучего остатка угля.

С увеличением степени углефикации значения первого порога зажигания $H_{cr}^{(1)}$ остаются практически постоянными, значения второго порога зажигания $H_{cr}^{(2)}$ снижаются, а значения третьего порога $H_{cr}^{(3)}$ возрастают.

Длительность свечения на первой стадии зажигания незначительно превышает длительность лазерного импульса и достигает 150 мкс для углей всех марок. Длительность свечения на второй стадии зажигания при $H = H_{cr}^{(2)}$ находится в миллисекундном временном интервале. На третьей стадии зажигания при $H = H_{cr}^{(3)}$ длительность свечения составляет величину 10–100 мс для образцов исследованных марок углей.

С ростом плотности энергии лазерного излучения длительность свечения на второй стадии зажигания в результате увеличения скорости термохимических реакций уменьшается до субмиллисекундного диапазона.

Для всех исследованных марок углей интенсивность свечения нарастает с момента воздействия лазерного импульса. В субмиллисекундном диапазоне наблюдается спад интенсивности свечения. Амплитуда свечения углей линейно

возрастает с увеличением плотности энергии лазерного излучения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института углехимии и химического материаловедения ФИЦ УУХ СО РАН по проекту АААА-А17-117041910150-2 и при поддержке гранта РФФИ 20-43-420019 p_a.

Авторы выражают благодарность Н. В. Нелюбиной за подготовку образцов углей, Н. И. Федоровой за проведение технического анализа углей и О. С. Ефимовой за проведение элементного анализа углей. Исследования проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ УУХ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Karpenko E. I., Messerle V. E., Ustimenko A. B. Plasma-aided solid fuel combustion // *Proc. Combust. Inst.* 2007. Vol. 31, No. 2. P. 3352–3360.
- 2 Askarova A. S., Karpenko E. I., Lavrishcheva Y. I., Messerle V. E., Ustimenko A. B. Plasma-supported coal combustion in boiler furnace // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2008. Vol. 35, No. 6. P. 1607–1616.
- 3 Messerle V. E., Ustimenko A. B., Askarova A. S., Nagibin A. O. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system // *Thermophys. Aeromech.* 2010. Vol. 17, No. 3. P. 435–444.
- 4 Aduев B. P., Nurmukhametov D. R., Nelyubina N. V., Kovalev R. Y., Zaostrovskii A. N., Ismagilov Z. R. Laser ignition of low-rank coal // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2016. Vol. 10, No. 6. P. 963–965.
- 5 Адуев B. П., Нурмухаметов Д. Р., Крафт Я. В., Исмагилов З. Р. Зажигание каменных углей различных стадий метаморфизма лазерными импульсами в режиме свободной генерации // *Оптика и спектроскопия.* 2020. Т. 128, № 3. С. 442–448.
- 6 Адуев B. П., Нурмухаметов Д. Р., Ковалев Р. Ю., Крафт Я. В., Заостровский А. Н., Гудилин А. В., Исмагилов З. Р. Спектрально-кинетические характеристики лазерного зажигания пылевидного бурого угля // *Оптика и спектроскопия.* 2018. Т. 125, № 2. С. 227–283.
- 7 Chen J. C., Taniguchi M., Narato K., Ito K. Laser ignition of pulverized coals // *Combustion and Flame.* 1994. Vol. 97, No. 1. P. 107–117.
- 8 Phuoc T. X., Mathur M. P., Ekmann J. E. High-energy Nd-YAG laser ignition of coals: Experimental observations // *Combustion and Flame.* 1993. Vol. 93, No. 1–2. P. 19–30.
- 9 Taniguchi M., Kobayashi H., Kiyama K., Shimogori Y. Comparison of flame propagation properties of petroleum coke and coals of different rank // *Fuel.* 2009. Vol. 88, No. 8. P. 1478–1484.
- 10 Погодаев В. А. Частица каменного угля в интенсивном каменном пучке // *Физика горения и взрыва.* 1984. Т. 20, № 1. С. 51–55.
- 11 Тайц Е. М., Андреева И. А. Методы анализа и испытания углей. М.: Недра, 1983. 301 с.
- 12 Korotkikh A. G., Slyusarskiy K. V., Sorokin I. V. Studying solid fuel ignition by CO₂-laser // *MATEC Web of Conferences.* 2017. Vol. 115, No. 03003.
- 13 Агроскин А. А., Глейбман В. Б. Теплофизика твердого топлива. М.: Недра, 1980. 240 с.
- 14 Агроскин А. А. Химия и технология угля. М.: Недра, 1969. 256 с.
- 15 Thomas K. M. Coal Structure. In: *Carbon and Coal Gasification.* J. L. Figueiredo, J. A. Moulijn (Eds.). NATO ASI Series. 1986. Vol. 105. P. 57–92.