

## ЗАЖИГАНИЕ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ ЛАЗЕРАМИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ДЛИНАМИ ВОЛН 450 И 808 нм

© 2023 г. Б. П. Адуев<sup>1,\*</sup>, Г. М. Белокуров<sup>1</sup>, И. Ю. Лисков<sup>1</sup>, З. Р. Исмагилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (ФИЦ УУХ СО РАН),  
650000 Кемерово, Россия

\*e-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.10.2022 г.

После доработки 18.11.2022 г.

Принята к публикации 07.12.2022 г.

Проведено измерение кинетических и энергетических характеристик зажигания порошков микро-частиц углей с насыпной плотностью 0.4 г/см<sup>3</sup> марок Г (газового), Ж (жирного), К (коксуемого) при воздействии лазерного излучения непрерывного действия с длинами волн  $\lambda = 450$  нм и  $\lambda = 808$  нм с временем экспозиции 1 с. Зажигание углей осуществляется только во время излучения, эффект распространения пламени отсутствует. Измерены времена задержки зажигания в зависимости от плотности мощности излучения и определены критические значения плотности энергии зажигания углей. Энергетические затраты на зажигание углей для излучения с  $\lambda = 808$  нм больше, чем для излучения с  $\lambda = 450$  нм для всех марок углей. Установлено, что поглощение лазерного излучения образцами углей имеет квантовый характер.

Ключевые слова: уголь, пылеугольное топливо, лазерное зажигание, горение

DOI: 10.31857/S0023117723040023, EDN: OMAJSW

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время взято направление на развитие безуглеродной энергетики. Тем не менее на ближайшие 10–20 лет каменные угли остаются основными материалами, применяемыми в энергетике. В связи с этим совершенствование методов сжигания угля с наибольшей эффективностью и наименьшим ущербом для окружающей среды является актуальной задачей.

В этом направлении перспективно развитие безмазутного розжига пылеугольного топлива в промышленных топках. Мазут приводит к ускоренной коррозии конструктивных элементов и наносит ущерб окружающей среде [1]. Эту задачу можно решить, используя физические методы розжига пылеугольного топлива. В литературе сообщается о применении плазмотронов [2, 3]. Другим подходом к решению этой задачи является применение лазеров для розжига пылеугольного топлива. Для нахождения технологических решений необходимо исследовать механизмы лазерного зажигания углей. Исследование энергетических и кинетических характеристик зажигания углей проводится с использованием неодимовых и СО<sub>2</sub> – лазеров [4–11]. Информацию о деталях механизма лазерного зажигания можно получить, используя импульсные лазеры в сочетании с регистрирующей электронно-оптической аппара-

турой, имеющей высокое временное разрешение. Такая информация получена в наших работах с использованием неодимового лазера с длительностью импульса  $\tau_i = 120$  мкс [12–20]. Установлено, что процесс зажигания углей условно можно разбить на три стадии: первая – зажигание микровыступов на поверхности угольных частиц во время лазерного импульса при достижении критической плотности энергии  $H_{cr}^1$ ; при повышении плотности энергии до  $H_{cr}^2$ , характерной для каждой марки угля, кроме процессов, протекающих при  $H_{cr}^1$ , происходит инициирование термохимических реакций в алифатической части макромолекулы угля, выход и зажигание летучих веществ; при достижении  $H_{cr}^3$ , кроме процессов зажигания поверхностных факелов, прогрета объема частиц, выхода и зажигания летучих веществ, происходит инициирование термохимических реакций в ароматической части макромолекулы угля и зажигание нелетучего остатка [21]. Каждая из стадий протекает в определенном временном интервале, которые измерены экспериментально. Измерены спектрально-кинетические характеристики свечения пламен на каждой стадии [18]. Таким образом, применение импульсного лазера и аппаратуры, способной регистрировать спектрально-кинетические характеристики зажигания с высоким

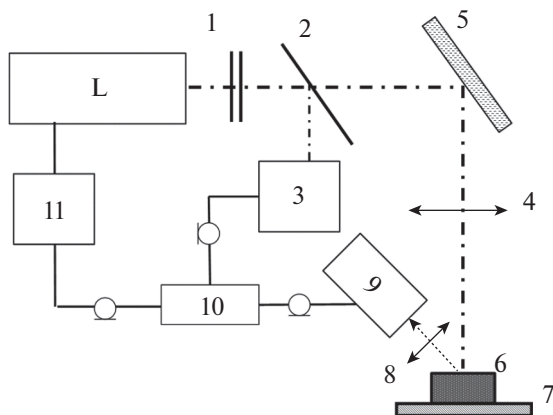
**Таблица 1.** Результаты технического анализа аналитических проб углей

Марка угля	Технический анализ, %			
	$W^a$	$A^d$	$V^{daf}$	$C$ , %
Г	1.2	3.3	40.4	81
Ж	0.8	7.8	33.3	88
К	0.6	4.9	21.3	90

Примечание.  $W^a$  – влага аналитическая,  $A^d$  – зольность,  $V^{daf}$  – показатель выхода летучих веществ,  $C$  – содержание углерода.

временным разрешением, позволили получить новую информацию о механизме зажигания угольных частиц.

Тем не менее для практического применения необходимо проводить исследования с использованием относительно дешевых полупроводниковых лазеров непрерывного действия. В связи с этим в настоящей работе проведено исследование зажигания широко применяемых каменных углей марок Г (газовый), Ж (жирный) и К (коксовый) с помощью излучения полупроводниковых лазеров непрерывного действия на длинах волн  $\lambda = 450$  нм и  $\lambda = 808$  нм и дана интерпретация результатов с помощью представлений полученных при использовании импульсного лазерного зажигания углей.



**Рис. 1.** Функциональная схема экспериментальной установки для измерения кинетических и энергетических характеристик зажигания углей: 1 – нейтральные светофильтры; 2 – светоделительная пластина; 3 – фотодиод; 4 – линза  $F = 25$  см; 5 – поворотное зеркало; 6 – образец; 7 – основание; 8 – линза  $F = 10$  см; 9 – фотоэлектронный умножитель; 10 – осциллограф; 11 – генератор Г5-56,  $L$  – источник лазерного излучения ( $\lambda = 808$  нм, либо  $\lambda = 450$  нм).

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА

В экспериментах применялись следующие марки каменных углей: газовый (Г) шахта им. Кирова, пласт Поленовский; жирный (Ж) шахта “Тихова”, пласт № 23 и коксовый (К) ООО “Участок кокосовый”, пласт II внутренний. Производились помол углей на шаровой мельнице АГО-2 и просеивание через сито с ячейкой 63 мкм. Просеянный порошок собирался в специальной посуде, закрытой для доступа воздуха.

Результаты технического анализа порошков углей, измеренные согласно ГОСТ Р.53357-2013, представлены в табл. 1.

Измерение распределения частиц порошков углей по размерам при помощи лазерного дифрактометра *Fritsch Analysette 22 comfort* показало, что частицы углей занимают диапазон от 0.5 до 63 мкм. Наибольшее число частиц содержится в диапазоне 10–40 мкм, максимум распределения находится при 20 мкм.

В экспериментах использовались образцы насыпной плотности с  $\rho = 0.4$  г/см<sup>3</sup>, которые помещались в медный капсюль диаметром 5 мм и глубиной 2 мм.

Функциональная схема экспериментальной установки для измерения кинетических и энергетических характеристик зажигания углей представлена на рис. 1.

Зажигание углей осуществлялось с помощью полупроводниковых лазеров (L) непрерывного действия на длинах волн  $\lambda = 808$  нм, либо  $\lambda = 450$  нм с регулируемой мощностью излучения до 10 и 20 Вт соответственно.

Мощность излучения регулировалась с помощью стеклянных нейтральных светофильтров (1) с известными коэффициентами ослабления. Для контроля мощности часть излучения (8%) отводилась прозрачной стеклянной пластиной (2) на калиброванный фотодиод (3). Нестабильность мощности излучения лазеров составляла не более 2%. С помощью фокусирующей линзы (4) с фокусным расстоянием  $F = 25$  см и поворотного зеркала (5) излучение направлялось на образец (6), находящийся на массивном основании (7). Площадь лазерного пятна на образце  $S = 0.03$  см<sup>2</sup>. Свечение образца собиралось линзой (8) и регистрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя *Hamamatsu H10721-20* (9) и осциллографа *LeCroy WaveJet WJ332A* (10). Синхронный запуск лазера и развертки осциллографа осуществлялся с помощью генератора импульсов Г5-56 (11). Время экспозиции лазерного излучения задавалось импульсным генератором (11) с максимальным значением  $t = 1$  с.

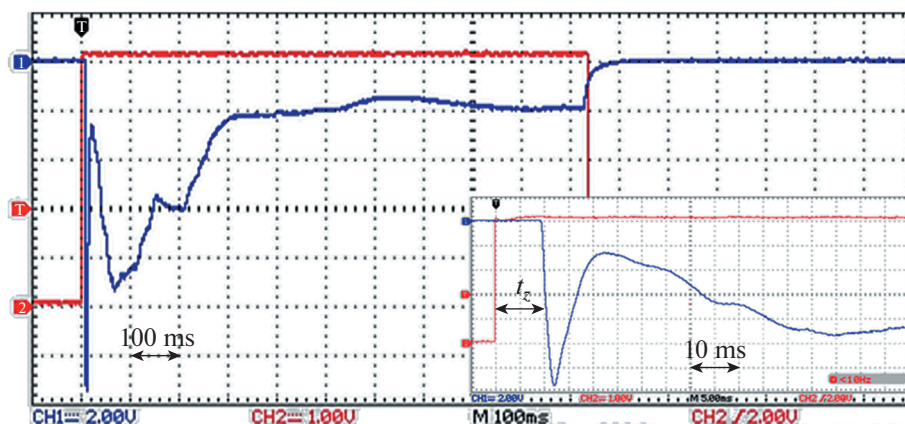


Рис. 2. Типичная осциллограмма зависимости интенсивности свечения от времени во время лазерного воздействия на  $\lambda = 808$  нм для угля марки Ж. На врезке показан начальный участок осциллограммы.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведено исследование кинетических характеристик зажигания микрочастиц каменных углей марок Г, Ж и К насыпной плотности во время воздействия лазерного излучения длительностью 1 с на длинах волн  $\lambda = 450$  нм и  $\lambda = 808$  нм. Типичная осциллограмма для угля марки Ж, зарегистрированная с помощью фотоумножителя (9) и осциллографа (10) (рис. 1), представлена на рис. 2. Для углей марок Г и К осциллограммы имеют аналогичный характер.

Для сравнения эффекта лазерного воздействия различных длин волн на угли представляет интерес нахождение вероятности зажигания образцов в зависимости от плотности мощности излучения  $W_p$ , поглощаемого образцом. Поскольку излучение полностью поглощается образцами углей, то  $W_p$  связана с экспозиционной плотностью мощности излучения  $W_e$  согласно (1):

$$W_p = (1 - R)W_e, \quad (1)$$

где  $R$  – коэффициент отражения образцов соответствующей марки угля.

Было проведено измерение коэффициентов отражения экспериментальных образцов углей марок Г, Ж и К для излучения с  $\lambda = 808$  нм и  $\lambda = 450$  нм с использованием фотометрического шара, аналогично работам [22, 23]. Результаты представлены в табл. 2.

Из рис. 2 видно, что зажигание углей начинается через определенное время экспозиции  $t_z$ . Как показал эксперимент, при использовании нескольких образцов на фиксированной мощности излучения время  $t_z$  имеет статистический характер, не связанный с нестабильностью интенсивности лазерного излучения. В связи с этим на каждой фиксированной мощности излучения производились эксперименты на многих образ-

цах до регистрации 5 вспышек. Далее вычислялись среднее значение  $t_z$  и доверительный интервал  $\Delta t_z$  для пяти измерений по методу Стьюдента. Значения  $t_z \pm \Delta t_z$  для углей марок Г, Ж и К при воздействии излучений с  $\lambda = 808$  и 450 нм представлены в табл. 3, 4 и 5 соответственно при различных плотностях мощности излучения  $W_e$  и  $W_p$ . Для наглядности на рис. 3 представлена графическая зависимость времен задержки зажигания  $t_z$  с доверительными интервалами  $\Delta t_z$  для угля марки Ж от плотности мощности лазерного излучения  $W_p$  для обоих типов лазеров. С ростом плотности мощности излучения время  $t_z$  монотонно уменьшается для всех марок углей при обоих видах излучения. При совпадающих для обоих видов излучения значения  $W_p$  соответствующие времена задержки зажигания совпадают в погрешности измерений (рис. 3).

В следующей серии экспериментов измерялись вероятности зажигания образцов углей в зависимости от плотности мощности лазерного излучения с  $\lambda = 808$  нм и  $\lambda = 450$  нм. При фиксированной плотности мощности последовательно облучали 10 образцов излучением с длительностью экспозиции 1 с. Наличие зажигания за вре-

Таблица 2. Коэффициенты отражения экспериментальных образцов углей марок Г, Ж и К на длинах волн 450 и 808 нм

R, %			
$\lambda$ , нм	Г	Ж	К
450	3.6	3.7	4.2
808	11.2	9.6	7.8

**Таблица 3.** Время задержки зажигания  $t_z$  и вероятности зажигания образцов угля марки Г в зависимости от плотности мощности излучения  $W_p$ , поглощенного образцами, и экспозиционной плотности мощности  $W_e$ 

808 нм				450 нм			
$W_e$ , Вт/см <sup>2</sup>	$W_p$ , Вт/см <sup>2</sup>	$t_z \pm \Delta t_z$ , мс	$P$	$W_e$ , Вт/см <sup>2</sup>	$W_p$ , Вт/см <sup>2</sup>	$t_z \pm \Delta t_z$ , мс	$P$
166	148	32 ± 2	1	314	303	1 ± 0.3	1
144	127	46 ± 3	1	226	217	2 ± 0.3	1
126	112	150 ± 20	0.9	196	189	4 ± 1	0.9
114	102	560 ± 110	0.6	193	186	6 ± 1	0.8
107	95	600 ± 140	0.5	182	176	7 ± 3	0.6
101	90	693 ± 167	0.3	178	172	9 ± 3	0.5
80	71		0	171	165	9 ± 3	0.3
67	59		0	166	160	19	0.1

**Таблица 4.** Время задержки зажигания  $t_z$  и вероятности зажигания образцов угля марки Ж в зависимости от плотности мощности излучения  $W_p$ , поглощенного образцами, и экспозиционной плотности мощности  $W_e$ 

808 нм				450 нм			
$W_e$ , Вт/см <sup>2</sup>	$W_p$ , Вт/см <sup>2</sup>	$t_z \pm \Delta t_z$ , мс	$P$	$W_e$ , Вт/см <sup>2</sup>	$W_p$ , Вт/см <sup>2</sup>	$t_z \pm \Delta t_z$ , мс	$P$
134	121	175 ± 80	1	219	211	9 ± 4	1
122	111	670 ± 120	0.9	202	195	12 ± 5	0.8
109	99	590 ± 120	0.7	191	184	14 ± 3	0.7
106	93	640 ± 130	0.5	174	168	18 ± 2	0.5
99	89	767 ± 150	0.3	165	159	27 ± 5	0.4
91	83	760 ± 200	0.2	163	157	45 ± 16	0.2
83	75		0	154	148		0

**Таблица 5.** Время задержки зажигания  $t_z$  и вероятности зажигания образцов угля марки К в зависимости от плотности мощности излучения  $W_p$ , поглощенного образцами, и экспозиционной плотности мощности  $W_e$ 

808 нм				450 нм			
$W_e$ , Вт/см <sup>2</sup>	$W_p$ , Вт/см <sup>2</sup>	$t_z \pm \Delta t_z$ , мс	$P$	$W_e$ , Вт/см <sup>2</sup>	$W_p$ , Вт/см <sup>2</sup>	$t_z \pm \Delta t_z$ , мс	$P$
195	179	130 ± 30	1	504	482	5.0 ± 0.5	1
173	159	386 ± 100	1	324	310	9.0 ± 0.8	1
153	141	540 ± 80	1	225	216	17 ± 1	1
134	124	635 ± 110	0.8	209	200	25 ± 7	0.8
122	113	774 ± 140	0.7	198	190	23 ± 13	0.7
117	108	670 ± 150	0.5	193	185	36 ± 7	0.6
109	101	578 ± 110	0.4	191	183	40 ± 7	0.5
106	97	600 ± 150	0.1	186	178	45 ± 8	0.3
99	91		0	176	169		0

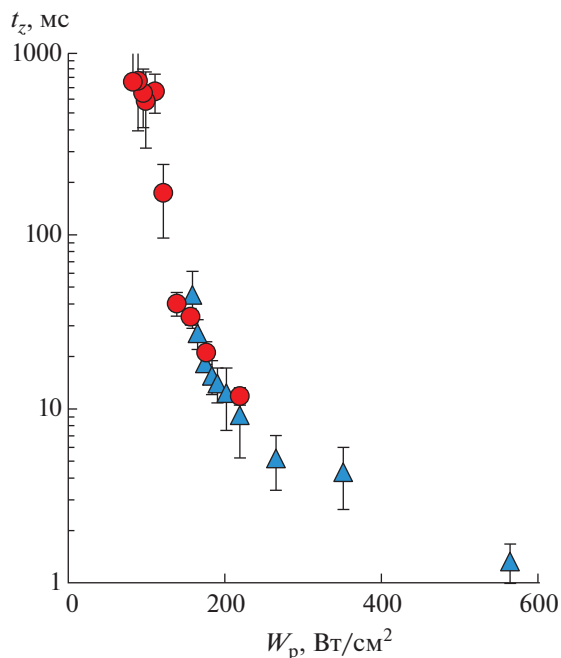
мя облучения фиксировалось по осциллограммам (рис. 2). Определяли вероятность зажигания:

$$P = n/N, \quad (2)$$

где  $n$  – число зажиганий во время воздействия лазерного излучения,  $N = 10$  общее число опытов на фиксированной плотности мощности.

Экспериментальные значения  $W_e$  и соответствующие значения  $W_p$ ,  $P$  рассчитанные по экспериментальным данным для углей марок Г, Ж и К с использованием выражений (1) и (2), представлены в табл. 3, 4 и 5 соответственно.

Для графической иллюстрации на рис. 4а представлены зависимости  $P(W_p)$  для угля мар-



**Рис. 3.** Зависимость времени задержки зажигания  $t_z$  угля марки Ж от плотности мощности лазерного излучения  $W_p$ , поглощаемого образцами ( $\blacktriangle$  –  $\lambda = 450$  нм,  $\bullet$  –  $\lambda = 808$  нм).

ки Ж, построенные по данным табл. 4 для обоих видов излучения.

Экспериментальные точки на рис. 4а аппроксимированы интегралом вероятности:

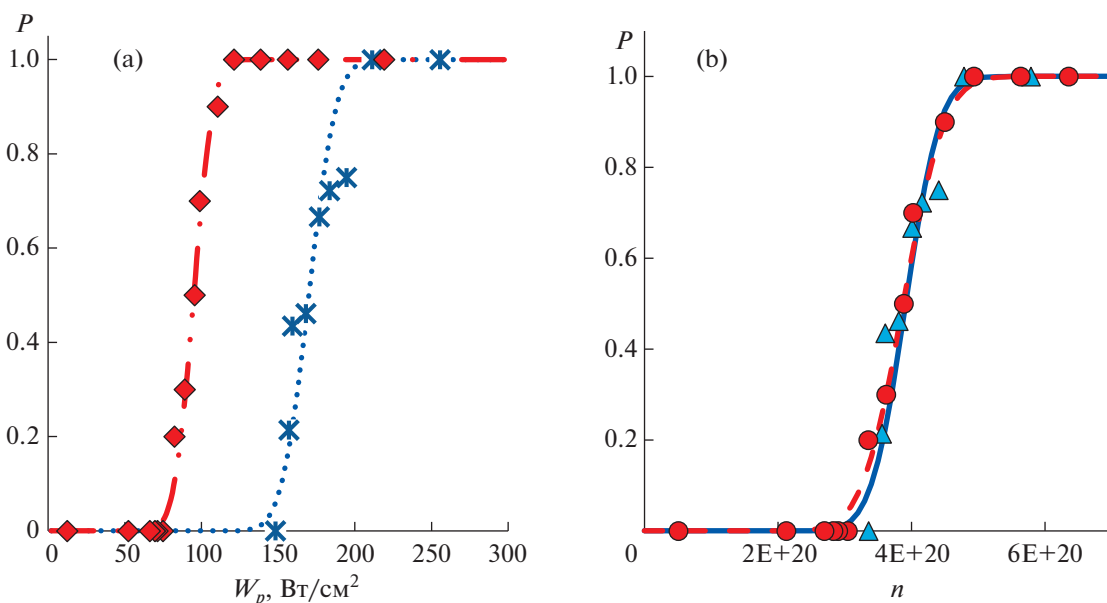
$$p(W) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^W \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{W - W_{cr}}{\Delta W}\right)^2\right] dW, \quad (3)$$

где  $W_{cr}$  – критическое значение плотности мощности лазерного излучения, соответствующее 50% вероятности появления вспышки,  $\Delta W$  – среднеквадратичное отклонение.

Аналогичная обработка результатов проведена для углей марок Г и К. Параметры зажигания всех исследованных марок углей  $W_{cr}$  и  $\Delta W$ , определенные для зависимости  $P(W_p)$ , представлены в табл. 6.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из осциллограмм рис. 2 следует, что после зажигания горение продолжается до конца лазерного воздействия и прекращается одновременно с облучением. Следовательно, переход к стационарному горению за время 1 с не наблюдается. Это справедливо для всех марок углей и любых мощностей излучения лазерных импульсов. Более того при увеличении времени экспозиции для всех марок углей горение прекращается после прекращения лазерного воздействия, либо при полном выгорании образцов в зоне облучения. Этот результат не вполне очевиден для любых условий зажигания. Например, в работе [6] частицы измельченных углей во взвешенном состоянии в ламинарном восходящем потоке зажигались импульсом YAG-Nd<sup>3+</sup>-лазера (1 Дж, 150 мкс, 1064 нм). Съемка горящих частиц видеокамерой показала, что после окончания лазерного им-



**Рис. 4.** (а) Вероятность зажигания угля марки Ж от плотности мощности лазерного излучения  $W_p$ , поглощаемого образцами ( $\square$  –  $\lambda = 450$  нм,  $\blacklozenge$  –  $\lambda = 808$  нм); (б) Зависимости вероятности зажигания  $P$  от числа поглощенных фотонов  $n$  в единицу времени на единичной площади угля марки Ж ( $\blacktriangle$  – 450 нм,  $\bullet$  – 808 нм).

**Таблица 6.** Критические значения плотности мощности лазерного излучения ( $W_{cr}$ ), соответствующие 50% вероятности появления вспышки, определенные для зависимости  $P(W_p)$  образцов углей марок Г, Ж и К и среднее квадратичное отклонение  $\Delta W$  на длинах волн 450 и 808 нм

$\lambda$	Г		Ж		К	
	$W_{cr}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\Delta W$ , Вт/см <sup>2</sup>	$W_{cr}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\Delta W$ , Вт/см <sup>2</sup>	$W_{cr}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\Delta W$ , Вт/см <sup>2</sup>
450	172	12	168	14	183	9
808	95	12	93	10	108	13

**Таблица 7.** Критические значения плотности энергии  $E_{cr}$ , поглощенной образцами углей марок Г, Ж и К, соответствующие 50% вероятности появления вспышки, для излучения лазеров с длиной волны 450 и 808 нм

$\lambda$ , нм	$t_{0.5}$ , с	$E_{cr}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\Delta E$ , Дж/см <sup>2</sup>	$n_{cr} \times 10^{24}$	Марка угля
450	0.009	1.5	0.5	0.04	Г
	0.03	4.5	0.6	0.1	Ж
	0.04	7.3	1.9	0.2	К
808	0.6	57	15	2.3	Г
	0.6	60	23	2.4	Ж
	0.7	72	19	2.9	К

Примечание. Показатель  $t_{0.5}$  – время задержки зажигания при вероятности 0.5,  $n_{cr}$  – число, поглощенных фотонов в единицу времени на единичной площади для вероятности зажигания  $P = 0.5$ .

пульса число горящих частиц увеличивалось, т.е. происходило распространение пламени. В условиях эксперимента, аналогичным в данной работе, но с использованием YAG-Nd<sup>3+</sup>-лазера (1 Дж, 120 мкс, 1064 нм) в наших работах, приведенных в списке литературы к данной статье [12–21], установлено, что максимальное время горения образцов насыпной плотности составляет от 30 мс для антрацита до 100 мс для бурого угля. В работе [4] исследовалось зажигание угольных частиц в условиях эксперимента аналогичных [6]. В этих экспериментах число частиц было мало, так что исключался эффект распространения пламени, и регистрировалось свечение отдельных частиц углей. Длительность свечения частиц антрацита и битумозного угля составила 30 и 50 мс соответственно. Таким образом, в условиях наших экспериментов с использованием импульсного излучения регистрировалось горение отдельных частиц и отсутствовало распространение пламени в образцах насыпной плотности. В данной работе получены аналогичные результаты на таких же образцах при использовании лазеров непрерывного действия. Таким образом, при использовании образцов насыпной плотности не удается до-

стичь эффекта распространения пламени и перехода к стационарному горению, что важно для решения практических задач, указанных во введении. Следовательно, необходимо использовать другой экспериментальный подход. Например, конструкция экспериментальной аппаратуры должна позволять прохождению потока воздуха с регулируемой скоростью через пылеугольное топливо. При этом станет возможным исследование лазерного зажигания углей в кипящем слое или вихревом потоке частиц. Обработка таких режимов позволит создать условия для распространения пламени и осуществить переход к стационарному режиму горения, что позволит проводить дальнейшую разработку установки, имитирующую лазерное зажигание в угольных топках.

Проведем оценку значения критической плотности энергии излучения  $E_{cr}$ , поглощенной образцами углей марок Г, Ж и К, затраченной для зажигания углей с вероятностью  $P = 0.5$ , для  $\lambda = 450$  нм и  $\lambda = 808$  нм.

Эту величину можно определить по формуле:

$$E_{cr} = W_{cr} t_{0.5}, \quad (4)$$

где  $t_{0.5}$  – время задержки зажигания для вероятности зажигания  $P = 0.5$ .

Значение  $t_{0.5}$  можно взять из табл. 3–5, значение  $W_{cr}$  можно взять из табл. 6. Значения  $E_{cr}$  для всех марок углей, рассчитанные по формуле (4), представлены в табл. 7.

Проведем оценку погрешности измерения значения критической энергии зажигания  $\Delta E_p$ . Исходя из формулы (4) для  $\Delta E_n$  можно записать:

$$\Delta E_{cr} = E_{cr} \sqrt{\left(\frac{\Delta t_{0.5}}{t_{0.5}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W_p}{W_p}\right)^2}. \quad (5)$$

Рассчитанные значения  $\Delta E_{cr}$  для всех марок углей представлены в табл. 7.

Из результатов, представленных в табл. 7, можно сделать следующие выводы. Во-первых, для фиксированной длины волны лазерного излучения время задержки зажигания  $t_{0.5}$  и энергетические затраты  $E_{cr}$  возрастают с ростом степени углефикации и уменьшением выхода летучих веществ (см. табл. 1). Для значения  $E_{cr}$  эффект отчетливо просматривается для излучения с  $\lambda = 450$  нм и слабее для излучения с  $\lambda = 808$  нм с учетом погрешности  $\Delta E$  рассчитанного значения  $E_{cr}$ . Во-вторых, при использовании излучения различных длин волн для конкретной марки угля энергетические затраты на зажигание при использовании излучения с  $\lambda = 450$  нм меньше, чем излучения с  $\lambda = 808$  нм. Последний результат показывает, что для практического применения ла-

зерного зажигания каменных углей более экономично использовать лазер с  $\lambda = 450$  нм.

На осциллограммах для всех марок углей в начальный момент зажигания наблюдается максимум излучения (рис. 2). Как показали спектрально-кинетические измерения с использованием углей марок Б (бурый) и ДГ (длинно-пламенный газовый) в аналогичном эксперименте [24], в этом максимуме присутствует свечение пламени СО. В последующие моменты времени спектры описываются только формулой Планка, т.е. в спектрах преобладает свечение углеродных частиц, как при зажигании нелетучего остатка в импульсных измерениях [18]. Подобие кинетических характеристик свечения, исследованных в данной работе углей и полученных ранее в аналогичных условиях эксперимента на углях Б и ДГ [24], позволяет предположить, что во всех углях зажигание имеет одинаковый характер. Вначале в результате нагрева до температуры воспламенения происходит выход из объема частиц и зажигание летучих веществ (первый пик на осциллограммах рис. 2), далее следует зажигание нелетучего остатка [24].

Рассмотрим еще один интересный факт. Плотность мощности излучения, поглощенного образцами углей, можно представить в виде:

$$W_p = nE_\phi, \quad (6)$$

где  $n$  – число поглощенных фотонов в единицу времени на единице поверхности.

$$E_\phi = hc/\lambda \quad (7)$$

– энергия фотона, где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $\lambda$  – длина волны излучения. На примере угля марки Ж преобразуем зависимость  $P(W_p)$  (рис. 4а) в зависимость от  $P(n)$ , используя выражения (6) и (7). Результат представлен на рис. 4б.

Как видно из рис. 4б, зависимость вероятности зажигания  $P$  от числа поглощенных фотонов  $n$  в единицу времени на единичной площади в погрешности эксперимента совпадает при использовании обоих видов излучения. Аналогичные результаты получены для углей марок Г и К. Это позволяет сделать вывод, что поглощение излучения носит квантовый характер, причем в единицу времени конкретной маркой угля поглощается одинаковое число фотонов обеих длин волн. Общее число поглощенных фотонов, необходимых для нагрева образцов углей до температуры воспламенения, можно определить из выражения

$$n_{cr} = E_{cr}/E_\phi = E_{cr}\lambda/(hc). \quad (8)$$

Рассчитанные значения  $n_{cr}$  представлены в табл. 7, откуда следует, что общее число поглощенных фотонов для нагрева угля конкретной марки до температуры воспламенения меньше

для излучения с  $\lambda = 450$  нм, чем для излучения с  $\lambda = 808$  нм.

Эти факты свидетельствуют о том, что, не смотря на то, что в единицу времени поглощается одинаковое число фотонов, дальнейшая диссипация энергии в образцах углей приводит к большему нагреву при поглощении излучения с  $\lambda = 450$  нм, чем с  $\lambda = 808$  нм.

Механизмы возможных фотохимических реакций при поглощении фотонов различных длин волн и дальнейшей диссипации энергии выходят за рамки данной статьи.

## ВЫВОДЫ

1. Горение образцов насыпной плотности углей марок Г, Ж и К при воздействии излучения полупроводниковых лазеров непрерывного действия с длинами волн 450 и 808 нм осуществляется только во время излучения. Для решения практических задач лазерного зажигания в угольных топках необходима разработка методик лазерного зажигания в кипящем слое или вихревом потоке угольных частиц.

2. Процесс лазерного зажигания пылеугольного топлива имеет статистический характер. Это проявляется как в статистике времени зажигания образцов  $t_z$  на фиксированной мощности излучения, так и в вероятностном характере критической энергии зажигания.

3. Для фиксированной длины волны лазерного излучения энергетические затраты  $E_{cr}$  на зажигание возрастают с ростом степени углефикации и уменьшением выхода летучих веществ в исследованных марках угля.

4. Энергетические затраты для зажигания каждой из марок углей меньше при использовании излучения с  $\lambda = 450$  нм, чем излучения с  $\lambda = 808$  нм.

5. Число квантов, поглощаемых угольным образцом в единицу времени на единицу площади, одинаково для обоих видов излучения

Исследования проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ УУХ СО РАН.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20041, <https://rscf.ru/project/22-13-20041/> и за счет гранта Кемеровской области – Кузбасса (соглашение с № 2 от 22.03.2022).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paul L.D., Seeley R.R. // Corrosion. 1991. V. 47. № 2. P. 152. <https://doi.org/10.5006/1.3585231>

2. *Askarova A.S., Karpenko E.I., Lavrishcheva Y.I., Mes-serle V.E., Ustimenko A.B.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2007. V. 35. P. 1607.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2007.910142>
3. *Masserle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A.* // Fuel Processing Technology. 2013. V. 107. P. 93.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.07.001>
4. *Chen J.C., Taniguchi M., Narato K., Ito K.* // Combustion and Flame. 1994. V. 97. № 1. P. 107.  
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)90119-8](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)90119-8)
5. *Глова А.Ф., Лыиков А.Ю., Зверев М.М.* // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 6. С. 537. [*Glova A.F., Lysikov A.Ju., Zverev M.M.* // Quantum Electron. 2009. V. 39. № 6. P. 537.  
<https://doi.org/10.1070/QE2009v039n06ABEH013906>]
6. *Taniguchi M., Kobayashi H., Kiyama K., Shimogori Y.* // Fuel. 2009. V. 88. № 8. P. 1478–.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.009>
7. *Boiko V.M., Volan'skii P., Klimkin V.F.* // Combust. Explos. Shock. Waves. 1981. V. 17. № 5. P. 545.  
<https://doi.org/10.1007/BF00798143>
8. *Phuoc T.X., Mathur M.P., Ekmann J.M.* // Combustion and Flame. 1993. V. 93. № 1–2. P. 19.  
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(93\)90081-D](https://doi.org/10.1016/0010-2180(93)90081-D)
9. *Погодаев В.А.* // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. № 1. С. 51–55. [*Pogodaev V.A.* // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1984. V. 20. № 1. P. 46.  
<https://doi.org/10.1007/BF00749917>]
10. *Kuzikovskii A.V., Pogodaev V.A.* // Combust. Explos. Shock. Waves. 1977. V. 13. № 5. P. 666.  
<https://doi.org/10.1007/BF00742231>
11. *Phuoc T.X., Mathur M.P., Ekmann J.M.* // Combustion and Flame. 1993. V. 94. № 4. P. 349.  
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(93\)90119-Ng](https://doi.org/10.1016/0010-2180(93)90119-Ng)
12. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Нелюбина Н.В., Ковалев Р.Ю., Заостровский А.Н., Исмагилов З.Р.* // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 12. С. 47. [*Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Nelyubina N.V., Kovalev R.Y., Zaostrovskii A.N., Ismagilov Z.R.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2016. V. 10. P. 963.  
<https://doi.org/10.1134/S1990793116060154>  
<https://doi.org/10.7868/S0207401X16120025>
13. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Ковалев Р.Ю., Крафт Я.В., Заостровский А.Н., Гудилин А.В., Исмагилов З.Р.* // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 2. С. 277. [*Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Kovalev R.Y., Kraft Ya.V., Zaostrovskii A.N., Ismagilov Z.R., Gudilin A.V.* // Opt. Spectrosc. 2018. V. 125. P. 293.  
<https://doi.org/10.1134/S0030400X18080039>  
<https://doi.org/10.1134/S0030400X18080039>
14. *Адуев Б.П., Крафт Я.В., Нурмухаметов Д.Р., Исмагилов З.Р.* // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. Т. 27. № 6. С. 549. [*Aduiev B.P., Kraft Y.V., Nurmukhametov D.R., Ismagilov Z.R.* // Chem. Sustain. Dev. 2019. V. 27. P. 549.  
<https://doi.org/10.15372/CSD2019172>  
<https://doi.org/10.15372/KhUR2019172>
15. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.* // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28. № 6. С. 535. [*Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R.* // Chem. Sustain. Dev. 2020. V. 28. P. 518.  
<https://doi.org/10.15372/CSD2020260>  
<https://doi.org/10.15372/KhUR2020260>
16. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.* // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 12. С. 1898. [*Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R.* // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. P. 2008.  
<https://doi.org/10.1134/S0030400X20120838>  
<https://doi.org/10.21883/OS.2020.12.50327.187-20>
17. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.* // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 3. С. 442. [*Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R.* // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. P. 429.  
<https://doi.org/10.1134/S0030400X20030029>  
<https://doi.org/10.21883/OS.2020.03.49073.302-19>
18. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.* // Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130. № 2. P. 1193.  
<https://doi.org/10.21883/OS.2022.08.52905.3750-22>
19. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.* // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 3. С. 13. [*Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Kraft Ya.V., Ismagilov Z.R.* // Russ. Phys. Chem. B. 2022. V. 16. P. 227.  
<https://doi.org/10.1134/S1990793122020026>  
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22030025>
20. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Нелюбина Н.В., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.* // Журнал прикладной спектроскопии. 2021. Т. 88. № 4. С. 582. [*Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Nelyubina N.V., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R.* // J. Appl. Spectrosc. 2021. V. 88. P. 761.  
<https://doi.org/10.1007/s10812-021-01237-w>
21. *Aduiev B.P., Kraft Y.V., Nurmukhametov D.R., Ismagilov Z.R.* // Combustion Science and Technology. 2022.  
<https://doi.org/10.1080/00102202.2022.2075699>
22. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Белокуров Г.М., Звекоев А.А., Каленский А.В., Никитин А.П., Лисков И.Ю.* // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 9. С. 126. [*Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Belokurov G.M., Zvekov A.A., Nikitin A.P., Liskov I.Y., Kalenskii A.V.* // Technical Physics. 2014. V. 59. № 9. P. 1387.  
<https://doi.org/10.1134/S1063784214090023>
23. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Звекоев А.А., Никитин А.П., Нелюбина Н.В., Белокуров Г.М., Каленский А.В.* // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 6. С. 60. [*Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Zvekov A.A., Nikitin A.P., Nelyubina N.V., Belokurov G.M., Kalenskii A.V.* // Instrum. Exp. Tech. 2015. V. 58. P. 765.  
<https://doi.org/10.1134/S0020441215050012>  
<https://doi.org/10.7868/S0032816215050018>
24. *Aduiev B.P., Belokurov G.M., Liskov I.Yu., Nurmukhametov D.R., Ismagilov Z.R.* // Eurasian Chem.-Technol. J. 2022. V. 24. P. 93.  
<https://doi.org/10.18321/ectj1321>