

УДК 544.452.1, 520.843.054

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

© 2023 г. Б. П. Адуев^{1,*}, Г. М. Белокуров¹, И. Ю. Лисков¹, З. Р. Исмагилов¹

¹ФГБУН 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/см³ марок Г (газового), Ж (жирного), К (коксующего) 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 СО₂ — 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, прогрева 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.

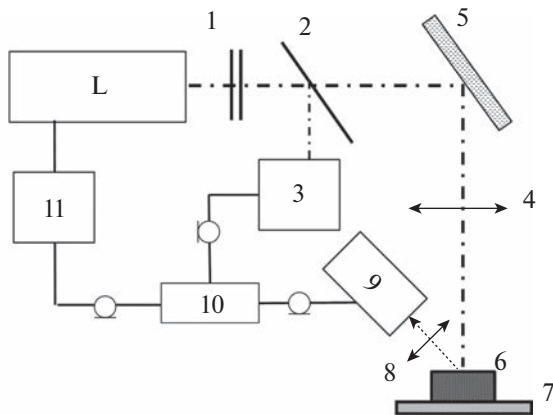


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для измерения кинетических и энергетических характеристик зажигания углей: 1 – нейтральные светофильтры; 2 – светоделительная пластина; 3 – фотодиод; 4 – линза $F = 25$ см; 5 – поворотное зеркало; 6 – образец; 7 – основание; 8 – линза $F = 10$ 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 коксовый”, 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 на сыпной плотности с $\rho = 0.4$ г/см³, 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 $S = 0.03$ см². 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.

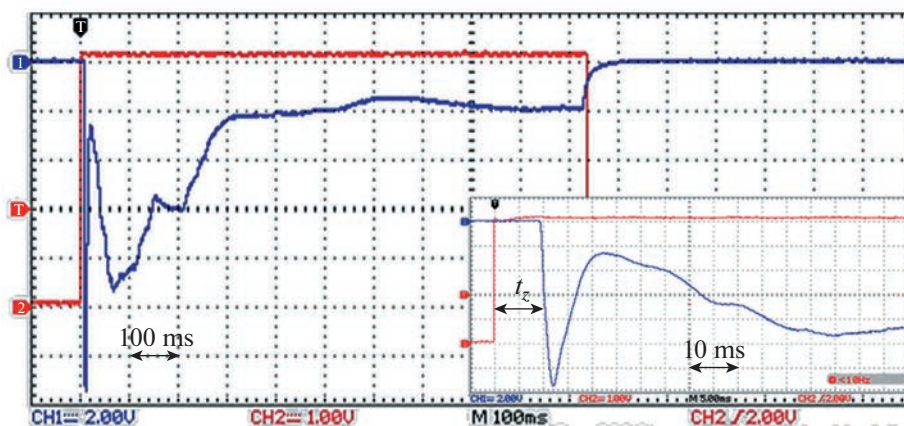


Рис. 2. Типичная осциллограмма зависимости интенсивности свечения от времени во время лазерного воздействия на $\lambda = 808$ нм для угля марки Ж. На врезке показан начальный участок осциллограммы.

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 Δt_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 Δt_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

λ , нм	R , %		
	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 ²	W_p , Вт/см ²	$t_z \pm \Delta t_z$, мс	P	W_e , Вт/см ²	W_p , Вт/см ²	$t_z \pm \Delta t_z$, 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 ²	W_p , Вт/см ²	$t_z \pm \Delta t_z$, мс	P	W_e , Вт/см ²	W_p , Вт/см ²	$t_z \pm \Delta t_z$, 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 ²	W_p , Вт/см ²	$t_z \pm \Delta t_z$, мс	P	W_e , Вт/см ²	W_p , Вт/см ²	$t_z \pm \Delta t_z$, 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

мю 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-

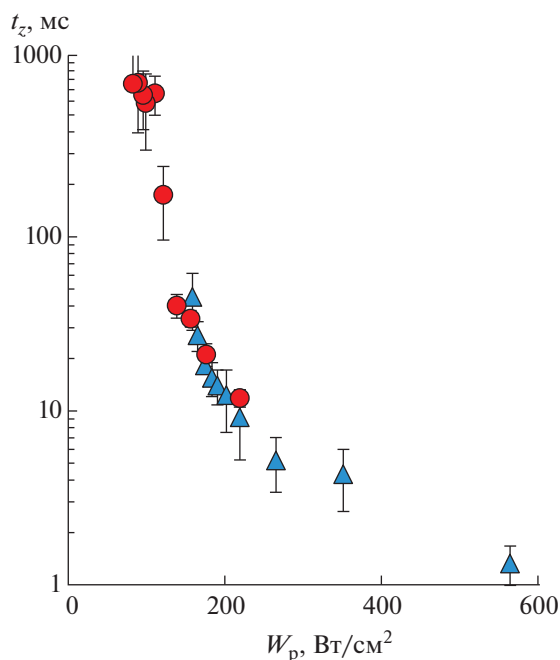
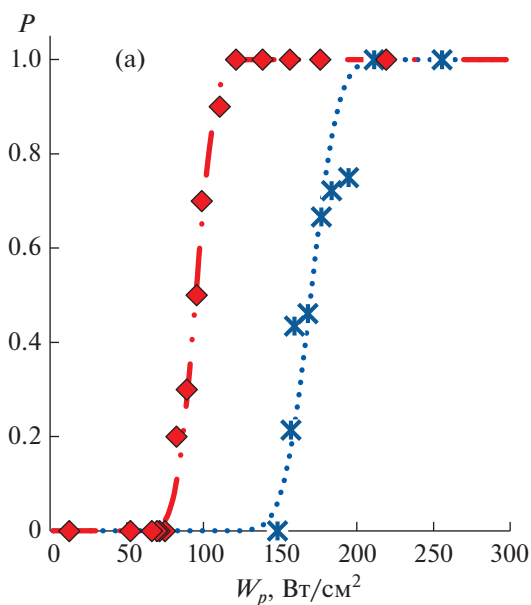


Рис. 3. Зависимость времени задержки зажигания t_z угля марки Ж от плотности мощности лазерного излучения W_p , поглощаемого образцами ($\blacktriangle$ — $\lambda = 450$ нм, $\bullet$ — $\lambda = 808$ нм).

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, ΔW — среднеквадратичное отклонение.

Аналогичная обработка результатов проведена для углей марок Г и К. Параметры зажигания всех исследованных марок углей W_{cr} и ΔW , 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-Nd³⁺-лазера (1 Дж, 150 мкс, 1064 нм). Съемка горящих частиц видеокамерой показала, что после окончания лазерного им-

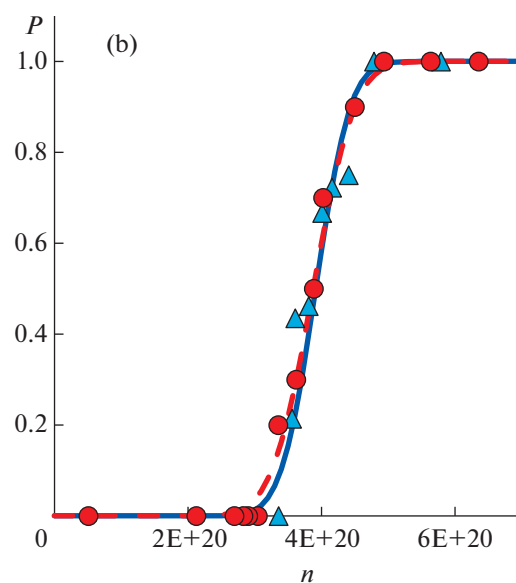


Рис. 4. (а) Вероятность зажигания угля марки Ж от плотности мощности лазерного излучения W_p , поглощаемого образцами ($\blacktriangle$ — $\lambda = 450$ нм, $\blacklozenge$ — $\lambda = 808$ нм); (б) Зависимости вероятности зажигания P от числа поглощенных фотонов n в единицу времени на единичной площади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

λ	Г		Ж		К	
	W_{cr} Вт/см ²	ΔW , Вт/см ²	W_{cr} Вт/см ²	ΔW , Вт/см ²	W_{cr} Вт/см ²	ΔW , Вт/см ²
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

λ , нм	$t_{0.5}$, с	E_{cr} Дж/см ²	ΔE , Дж/см ²	$n_{cr} \times 10^{24}$	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-Nd³⁺-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 ΔE_p . Исходя из формулы (4) для ΔE_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 ΔE_{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 ΔE 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, λ — 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., Messerle 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., Lavrishchev 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., Лысков А.Ю., Зверев М.М. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 6. С. 537. [Glova A.F., Lysikov A.Yu., 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., Лысков 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., Lyskov 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., Lyskov I.Yu., Nurmukhametov D.R., Ismagilov Z.R. // Eurasian Chem.-Technol. J. 2022. V. 24. P. 93.
<https://doi.org/10.18321/ectj1321>