

УДК 535.341;544.454

## ЛАЗЕРНОЕ ЗАЖИГАНИЕ МИКРОЧАСТИЦ НИЗКОМЕТАМОРФИЗОВАННОГО КАМЕННОГО УГЛЯ В ДИАПАЗОНЕ РАЗМЕРОВ 0.4–33 мкм

© 2023 г. Б. П. Адуев<sup>1</sup>, Д. Р. Нурмухаметов<sup>1</sup>, Н. В. Нелюбина<sup>1</sup>, И. Ю. Лисков<sup>1\*</sup>, З. Р. Исмагилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, Кемерово, Россия

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

Поступила в редакцию 09.05.2022;

после доработки 16.07.2022;

принята в печать 20.07.2022

Исследовано зажигание микрочастиц низкометаморфизованного каменного угля марки “ДГ” (длиннопламенный газовый) для фракций с распределением в диапазоне размеров  $d = 0.4–33$  мкм при воздействии лазерных импульсов (1064 нм, 120 мкс, 1.3 Дж). Установлено совпадение кинетических характеристик зажигания углей при воздействии лазерных импульсов с различными плотностями энергии на образцы как в узком, так и широком диапазонах размеров частиц. Минимальные значения трех изученных пороговых плотностей лазерной энергии для стадий зажигания получены для фракции частиц угля размером 2.2 мкм. При работе с угольной пылью следует учитывать, что при воздействии тепловых источников энергии наиболее легко воспламеняемыми являются частицы с размерами 1–10 мкм.

*Ключевые слова:* каменный уголь, лазерное зажигание, микрочастицы угля, стадии зажигания, технический анализ угля.

DOI: 10.31857/S0207401X23030032, EDN: LXPVLP

### ВВЕДЕНИЕ

Для исследования механизмов зажигания угольных частиц широкое применение находит импульсное лазерное излучение. Частицы угля поглощают лазерное излучение, что вызывает их нагрев и воспламенение, т.е. по существу, осуществляется тепловое зажигание угля.

Импульсный лазер в сочетании с оптоэлектронной аппаратурой с высоким временным разрешением дает возможность изучать процессы зажигания углей на начальных стадиях [1–8]. Это позволяет детализировать механизмы зажигания, проводить сравнительные исследования различных марок угля.

Ранее в таких исследованиях применяли неодимовый лазер с длительностью импульса  $\tau = 5$  мс [1–4]. Как было установлено в наших работах [7–13], для исследования механизмов зажигания необходимо использовать лазеры с более короткой длительностью импульсов в сочетании с время-разрешающей электронно-оптической аппаратурой для регистрации быстропротекающих процессов на начальной стадии зажигания углей. В работах [7–13] при использовании YAG:Nd<sup>3+</sup> неодимового лазера с длительностью импульса  $\tau =$

$= 120$  мкс установлено, что на начальном этапе можно выделить, по крайней мере, три стадии зажигания, отличающиеся временными интервалами и характерными пороговыми плотностями лазерной энергии (далее – пороги),  $H_{cr}$ .

На первой стадии, совпадающей по времени с длительностью лазерного импульса, происходят нагрев и зажигание микровыступов на поверхности частицы угля. Для этой стадии характерны пороги зажигания  $H_{cr}^{(1)}$  [13]. На второй стадии, характеризующейся пороговыми значениями плотности лазерной энергии  $H_{cr}^{(2)}$ , происходит нагрев частиц угля, достаточный для инициирования термохимических реакций в объеме частиц. Это приводит к выходу из объема и воспламенению летучих веществ и раскаленных углеродных частиц во временном интервале  $t < 10$  мс [13]. При увеличении плотности энергии до значений  $H_{cr}^{(3)}$  (характерной для каждой марки угля), помимо процессов, происходящих на второй стадии, в объеме частиц инициируются термохимические реакции, протекающие во временном интервале  $\tau \sim 10–100$  мс, связанные с зажиганием нелетучего остатка макромолекулы угля [13]. Таким образом, относительно короткая длительность лазер-

Таблица 1. Размеры частиц в максимуме распределения для фракций угля марки “ДГ”

Фракция	$d$ , мкм
ДГ1	33
ДГ2	24
ДГ3	18
ДГ4	12
ДГ5	9
ДГ6	7
ДГ7	2.2
ДГ8	1.3
ДГ9	0.6
ДГ10	0.4

ного импульса дает новую информацию о механизме зажигания угольных частиц.

До сих пор во всех экспериментах, как в работах [1–4], так и в работах [7–13], использовали образцы углей с распределением частиц по размерам в широком диапазоне, в частности в работах [7–13] исследовали частицы размерами  $d \leq 100$  мкм или  $d \leq 63$  мкм. Важной практической характеристикой лазерного излучения для зажигания угля является минимальная тепловая энергия, при которой происходит воспламенение угольных частиц. Учет этих характеристик необходим при разработке безопасных методов работы с угольными частицами в шахтах и угольных печах [14–17]. Пороги стадий зажигания частиц зависят от их размеров. Считается, что в этом отношении наиболее легко воспламеняемой является угольная пыль. Тем не менее изучение порогов стадий зажигания в зависимости от размеров микрочастиц до настоящего времени не проводилось.

В настоящей работе представлено исследование лазерного зажигания микрочастиц низкометаморфизованного угля марки “ДГ” (длиннопламенный газовый) в диапазоне размеров частиц  $d = 0.4–33$  мкм на трех стадиях зажигания, описанных выше. Выбор марки угля связан с тем, что, как показывает практика, низкометаморфизованные каменные угли при дроблении и помоле дают большее количество пыли, чем угли более высокой степени метаморфизма.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования использовали уголь марки “ДГ”. Помол относительно крупных частиц (3 мм) проводили на шаровой мельнице АГО-2. Измельченные частицы подвергались мокрому рассеиванию через вибрационное сито с размером ячейки 63 мкм. В результате получали фракцию угля с широким диапазоном размеров

частиц ( $d \leq 63$  мкм). На следующем этапе для получения более узких фракций использовали центрифугу МРВ-340 (Польша) следующих скоростях вращения: 3000, 2500, 2000, 1500 об/мин в течение 15 мин и 1000 об/мин в течение 10 мин. Неосажденную взвесь сливали и сушили при температуре 95°C. После центрифугирования осажденный осадок разделяли методом гравитационного осаждения (седиментация) в течение 40, 20 и 10 мин. Для измерения размеров частиц в полученных фракциях делали микрофотографии с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390 LV (JEOL, Япония). На основе их обработки строили гистограммы распределения частиц по размерам, которые включали 400–500 частиц на каждый размер. Для примера на рис. 1 представлены микрофотографии частиц угля марки “ДГ” и построенные с их помощью гистограммы распределения частиц по размерам для двух крайних случаев –  $d = 33$  мкм (рис. 1а, в) и  $d = 0.4$  мкм (рис. 1б, г). Значение  $d$  в максимуме распределения рассчитывали по формуле

$$d = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i}, \quad (1)$$

где  $n_i$  – число частиц, имеющих размер  $d_i$ . Аналогичные измерения проводились для всего размерного ряда частиц. Значения размеров частиц в максимуме распределения представлены в табл. 1.

Для всех полученных фракций проводился технический анализ, а также анализ на содержание азота, углерода, водорода и серы в общей массе угля. Результаты анализов представлены в табл. 2.

В экспериментах использовались образцы насыпной плотности  $\rho = 0.5$  г/см<sup>3</sup>, которые помещали в медный патрон диаметром 2.5 мм и глубиной 1 мм. Измерения проводили на установке, аналогичной применяемой в работе [9]. Схема установки для измерения кинетических характеристик свечения на разных стадиях и порогов зажигания фракций угля представлена на рис. 2.

В качестве источника лазерного излучения использовал импульсный YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазер, работающий в режиме свободной генерации на длине волны  $\lambda = 1064$  нм. Длительность импульса составляла  $\tau_{\text{и}} = 120$  мкс, диаметр лазерного пятна на образце был равен 2.5 мм. Нестабильность энергии импульса лазера не превышала 2%.

Регулирование энергии лазерного излучения осуществляли с помощью набора стеклянных светофильтров 1 с известными коэффициентами ослабления излучения. Для контроля часть энергии лазерного излучения (8%) отводила светоделительной пластиной 2 на пироэлектрический преобразователь PE50BF-C (Ophir Optronics Solution, Израиль). Лазерное излучение с помощью фокусирующей линзы 3 с фокусным расстоянием, равным 25 см, и поворотного зеркала 4 направля-

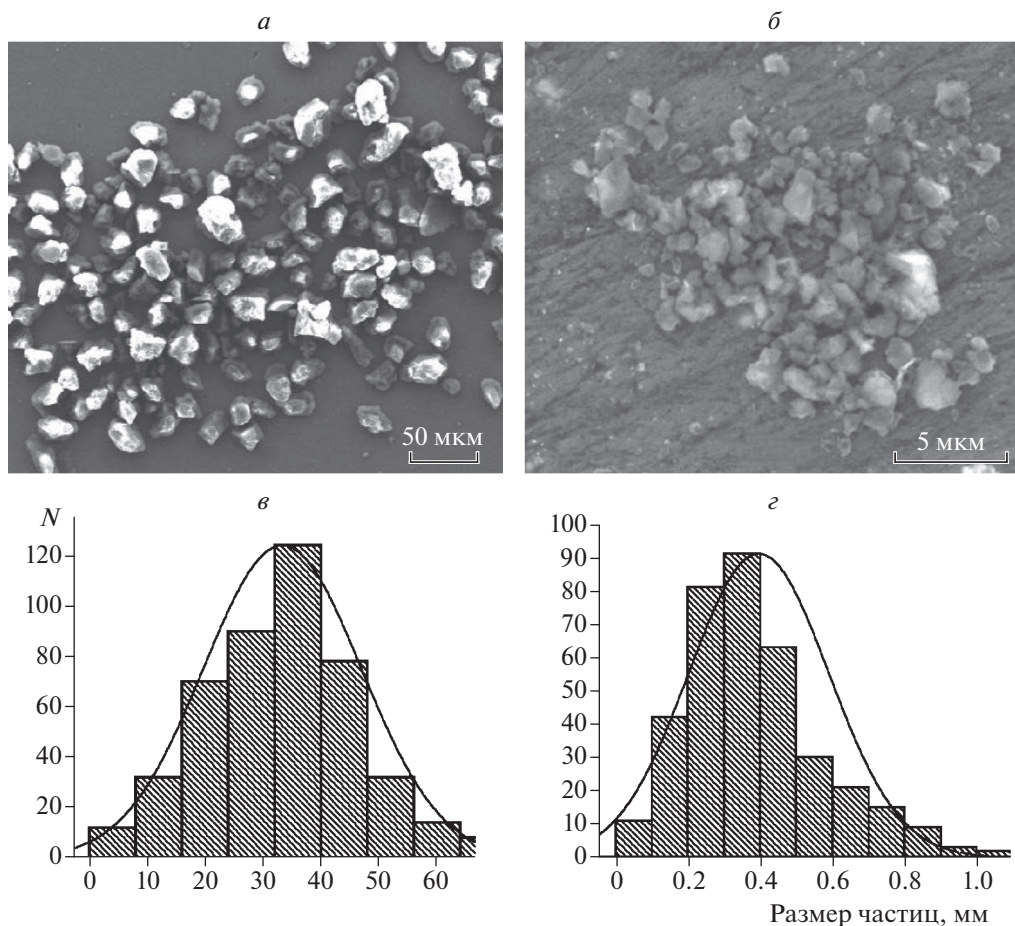


Рис. 1. Микрофотографии частиц угля марки “ДГ” (а, б) и гистограммы их распределения по размерам (в, г).

лось на образец угля 5, находящийся на массивном основании б. Свечение, возникающее при воздействии импульса излучения на образец, фиксируется фотоэлектронным умножителем Н-10721-01 (Hamamatsu, Япония), имеющим временное разрешение, равное 0.5 нс, преобразуется в электрический сигнал и регистрируется цифровым осциллографом WJ332A 7 (Teledyne LeCroy, США).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В эксперименте определяли кинетические характеристики свечения поверхности образцов при зажигании частиц угля и пороговые характеристики соответствующих стадий зажигания ( $H_{cr}^i$ ). Использовали частицы с размерами в максимумах распределения, приведенных в табл. 1.

Для эксперимента выбирали частицы определенного размера, воздействовали на них лазерным излучением и регистрировали свечение частиц угля с помощью фотоумножителя. По мере увеличения плотности энергии лазерного излучения наблюдались осциллограммы трех видов, со-

ответствующие трем стадиям зажигания, описанным выше. На рис. 3 представлены осциллограммы свечения, соответствующие трем стадиям зажигания для частиц с размерами в максимуме распределения  $d = 2.2$  мкм. Аналогичные зависимости интенсивности свечения от времени на трех стадиях зажигания наблюдаются для всех частиц, размеры которых представлены в табл. 1.

Кроме того, были определены вероятность стадии зажигания в зависимости от плотности энергии излучения и критическая плотность энергии, соответствующая 50%-ной вероятности стадии зажигания, которая принималась за порог  $i$ -той стадии зажигания  $H_{cr}^i$ . Для этого последовательно 10 образцов облучали единичным импульсом лазера с фиксированной плотностью энергии, и регистрировали свечение с помощью фотоумножителя. Вероятность зажигания рассчитывали как

$$P = \frac{n}{10}, \quad (2)$$

где  $n$  – число зарегистрированных вспышек.

Таблица 2. Результаты технического и элементного анализов фракций угля марки “ДГ”

Фракция	$d$ , мкм	Технический анализ			Элементный анализ (ОМУ)			
		$W^a$ , %	$A^a$ , %	$V^a$ , %	N, %	$C_{daf}^a$ , %	H, %	S, %
ДГ1	33	4.7	3.53	41.21	2.1	70.0	5.0	0.1
ДГ2	24	4.7	3.81	40.90	2.05	69.4	4.9	0.12
ДГ3	18	4	3.46	44.33	2.05	71.2	5.0	0.1
ДГ4	12	4	5.38	38.70	2.0	68.7	4.8	0.1
ДГ5	9	4.2	15.23	40.28	2.0	68.2	4.6	0.1
ДГ6	7	3.2	18.49	42.37	1.9	65.1	4.5	0.14
ДГ7	2.2	3.2	23.23	37.23	1.8	60.3	4.3	0.18
ДГ8	1.3	3.2	28.17	40.01	1.7	56.1	4.1	0.2
ДГ9	0.6	4.2	3.74	41.80	1.6	53.1	3.9	0.32
ДГ10	0.4	4.7	3.53	41.21	1.4	47.9	3.7	0.6

Примечание:  $W^a$  – влага аналитической пробы,  $A^a$  – зольность аналитической пробы,  $V^a$  – выход летучих веществ на аналитическое состояние,  $C_{daf}^a$  – содержание связанного углерода в аналитической пробе, ОМУ – на общую массу угля.

Далее плотность энергии последовательно увеличивали, и эксперимент повторялся до получения значения  $P \approx 1$ . Экспериментальные результаты аппроксимировали интегралом вероятности:

$$P(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^H \frac{\exp(H - H_{cr})}{2\Delta H} dH, \quad (3)$$

где  $H$  – плотность энергии лазерного излучения,  $H_{cr}$  – плотность энергии, соответствующая 50%-ной вероятности появления вспышки (порог стадии зажигания),  $\Delta H$  – среднеквадратичное отклонение. Таким образом, определяли порог пер-

вой стадии зажигания для определенного размера частиц  $H_{cr}^{(1)}$  (рис. 4, кривая 1).

Как указывалось выше,  $H_{cr}^{(1)}$  в работе [10] авторы связывали с зажиганием микровыступов на поверхности частиц размером  $d \sim 1$  мкм. В данной работе использовались различные размеры частиц, в том числе и  $d \leq 1$  мкм. В связи с этим, с учетом “мелких” частиц  $H_{cr}^{(1)}$  следует трактовать более широко. Порог  $H_{cr}^{(1)}$  связан со стадией зажигания факелов на поверхности угольных частиц, но при этом поглощенной энергии недостаточно для объемного прогрева и возбуждения термохимических реакций в объеме частиц.

Далее увеличивали плотность лазерной энергии до появления на экране осциллограмм, соответствующих второй стадии зажигания (рис. 4, кривая 2). Рассчитывали зависимость  $P(H)$  и  $H_{cr}^{(2)}$  по вышеописанной процедуре. При дальнейшем увеличении плотности лазерной энергии при появлении осциллограмм, соответствующих третьей стадии зажигания, определяли зависимость  $P(H)$  и  $H_{cr}^{(3)}$  (рис. 4, кривая 3) как в предыдущем случае.

На рис. 4 представлены вероятности для трех стадий зажигания частиц угля с размерами в максимуме распределения  $d = 2.2$  мкм. Эксперименты повторяли с использованием всех частиц, размеры которых представлены в табл. 1. Пороги на трех стадиях зажигания частиц различных размеров представлены в табл. 3.

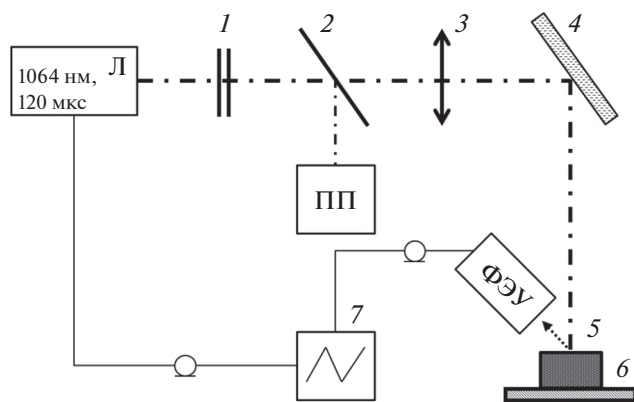
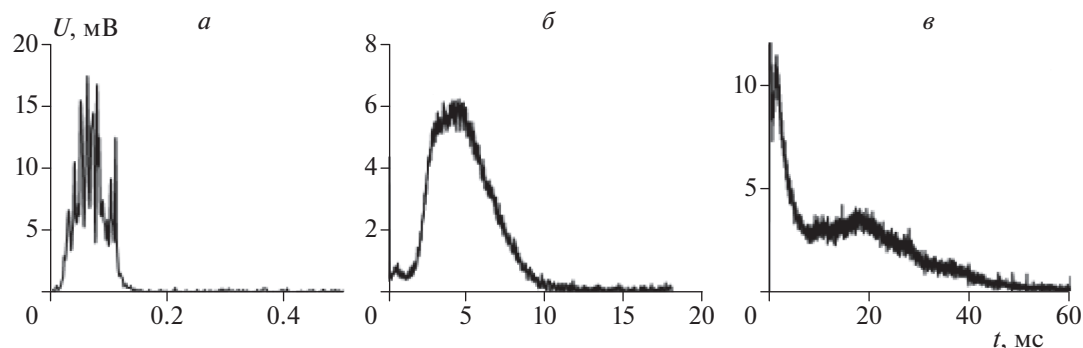
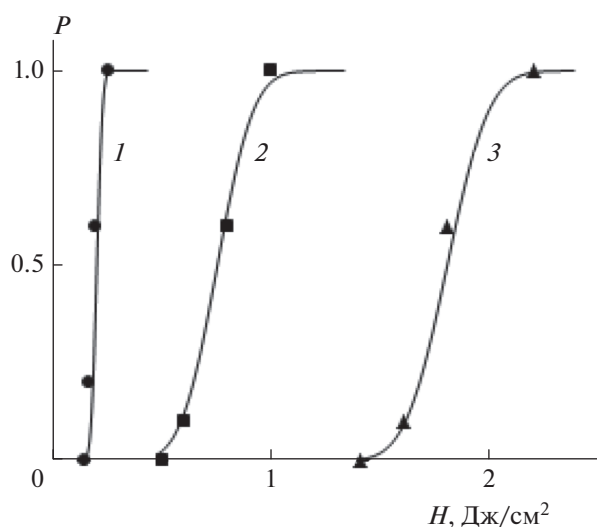


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки: 1 – нейтральные светофильтры, 2 – светоделительная пластина, 3 – линза, 4 – поворотное зеркало, 5 – образец, 6 – массивное основание, 7 – осциллограф, Л – импульсный YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазер, ПП – пироэлектрический приемник, ФЭУ – фотоэлектрический умножитель.



**Рис. 3.** Зависимости интенсивности свечения частиц угля марки “ДГ” размером 2.2 мкм от времени на различных стадиях зажигания: *a* –  $H_{cr}^{(1)} = 0.2 \text{ Дж/см}^2$ , *б* –  $H_{cr}^{(2)} = 0.8 \text{ Дж/см}^2$ , *в* –  $H_{cr}^{(3)} = 1.8 \text{ Дж/см}^2$ .



**Рис. 4.** Зависимость вероятности *P* возникновения характерного типа свечения (см. осциллограммы, рис. 3а, б, в) частиц угля марки “ДГ” размером  $d = 2.2 \text{ мкм}$  от плотности энергии *H* лазерного излучения.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

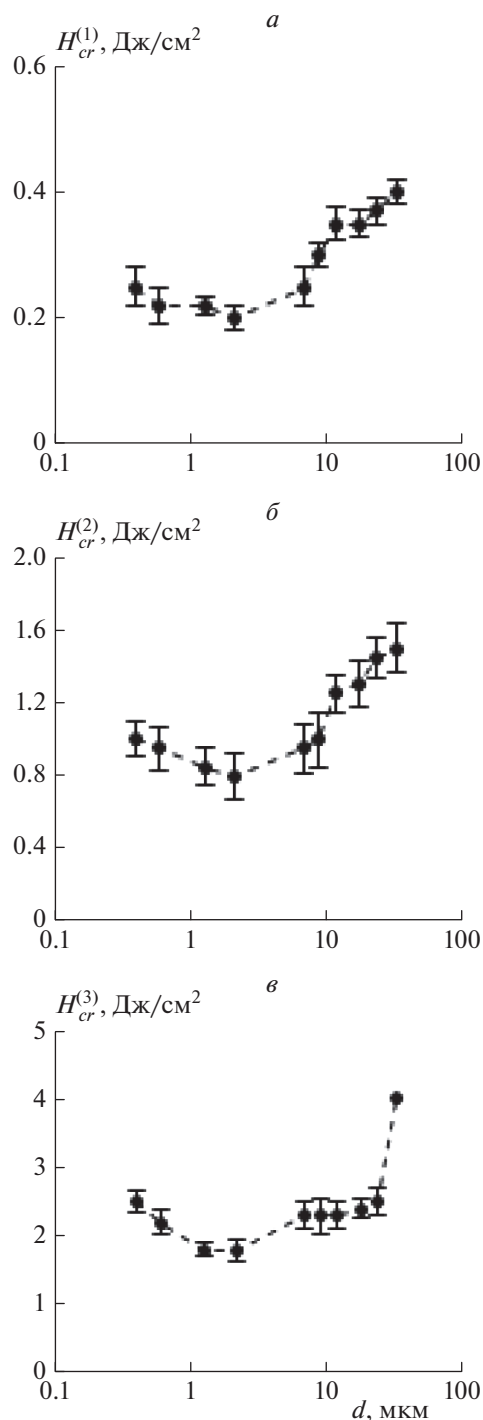
Как указано выше, результаты, представленные на рис. 3 для частиц размерами в максимуме распределения  $d = 2.2 \text{ мкм}$ , практически совпадают с результатами для всех размеров частиц, представленных в табл. 1. Более того, сравнение с кинетическими характеристиками на трех стадиях зажигания, полученными на образцах с широким гранулометрическим составом, дают похожие результаты [13]. Это позволяет сделать вывод, что, по-видимому, наблюдаемые процессы связаны с химическими реакциями в макромолекулах угля, а не с коллективом частиц.

Детализация процесса зажигания, характеризующаяся тремя стадиями, также сохраняется, однако наблюдается зависимость пороговых значений на каждой стадии зажигания от размеров частиц.

На рис. 5 представлены пороги для трех стадий зажигания угля марки “ДГ” в зависимости от размеров частиц, построенные по данным табл. 3. Из рис. 5 видно, что зависимости  $H_{cr}^{(i)}(d)$  на всех трех стадиях носят немонотонный характер: минимумы

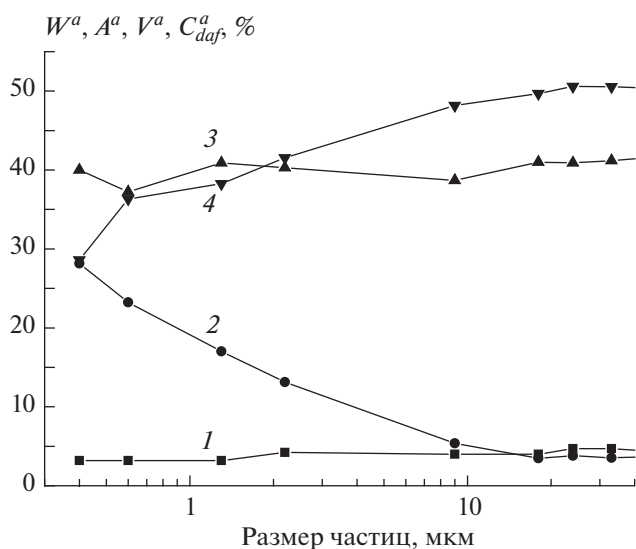
**Таблица 3.** Значения пороговой плотности лазерной энергии для трех стадий зажигания угля марки “ДГ” в зависимости от размеров частиц

Фракция	<i>d</i> , мкм	$H_{cr}^{(1)}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\Delta H_{cr}^{(1)}$	$H_{cr}^{(2)}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\Delta H_{cr}^{(2)}$	$H_{cr}^{(3)}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$H_{cr}^{(3)}$
ДГ1	33	0.40	0.02	1.50	0.13	4.00	
ДГ2	24	0.37	0.02	1.45	0.11	2.50	0.20
ДГ3	18	0.35	0.02	1.30	0.13	2.40	0.15
ДГ4	12	0.35	0.03	1.25	0.10	2.30	0.20
ДГ5	9	0.30	0.02	1.00	0.15	2.30	0.25
ДГ6	7	0.25	0.03	0.95	0.13	2.30	0.20
ДГ7	2.2	0.20	0.02	0.80	0.13	1.80	0.15
ДГ8	1.3	0.22	0.02	0.85	0.10	1.80	0.10
ДГ9	0.6	0.22	0.03	0.95	0.12	2.20	0.17
ДГ10	0.4	0.25	0.03	1.00	0.10	2.50	0.15



**Рис. 5.** Пороговая плотность лазерной энергии для трех стадий зажигания частиц угля марки “ДГ” в зависимости от их размеров: *a* – первая стадия  $H_{cr}^{(1)}$ , *б* – вторая стадия  $H_{cr}^{(2)}$ , *в* – третья стадия  $H_{cr}^{(3)}$ .

функции для  $H_{cr}^{(1)} = 0.2$  Дж/см<sup>2</sup>,  $H_{cr}^{(2)} = 0.8$  Дж/см<sup>2</sup>,  $H_{cr}^{(3)} = 1.8$  Дж/см<sup>2</sup> достигаются при одинаковом размере частиц  $d_{min} = 2.2$  мкм. При отклонении от



**Рис. 6.** Зависимость технических показателей угля марки “ДГ” от размеров частиц: 1 – влажность  $W^a$ ; 2 – зольность  $A^a$ ; 3 – выход летучих веществ  $V^a$ ; 4 – содержание связанного углерода  $C_{daf}^a$ .

значения  $d_{min}$  в большую или меньшую сторону наблюдается рост  $H_{cr}^{(i)}$ , особенно резкий на третьей стадии зажигания.

Для интерпретации результатов воспользуемся данными технического и элементного анализа для частиц всех размеров угля марки “ДГ” (табл. 2). Для наглядности данные табл. 2 представим в графическом виде (рис. 6 и 7).

Из рис. 6 следует, что в погрешности измерений зависимость содержания влаги (1) и летучих веществ (3) почти не зависит от размеров частиц. Величина зольности (2) практически не зависит от размеров частиц в диапазоне 9–33 мкм. При дальнейшем уменьшении размеров в диапазоне 0.4–9 мкм величина  $A^a$  возрастает от ~5 до 29%. Из рис. 7 следует, что содержание углерода в диапазоне 9–33 мкм практически не зависит от размеров частиц (68–70%), а при уменьшении размеров в диапазоне 0.4–9 мкм оно падает до ~48%. С нашей точки зрения, именно эти параметры определяют пороговые зависимости  $H_{cr}$  от размеров частиц. При уменьшении размеров от максимальных до 9 мкм  $H_{cr}$  на всех трех стадиях зажигания уменьшается при постоянстве параметров  $A^a$  и  $C_{daf}^a$ , поскольку облегчается зажигание частиц с уменьшением размеров. При дальнейшем уменьшении размеров частиц возрастает величина зольности  $A^a$  и уменьшается содержание углерода  $C_{daf}^a$ , что должно приводить к затруднению зажигания, т.е. к увеличению  $H_{cr}$ . В результате дей-



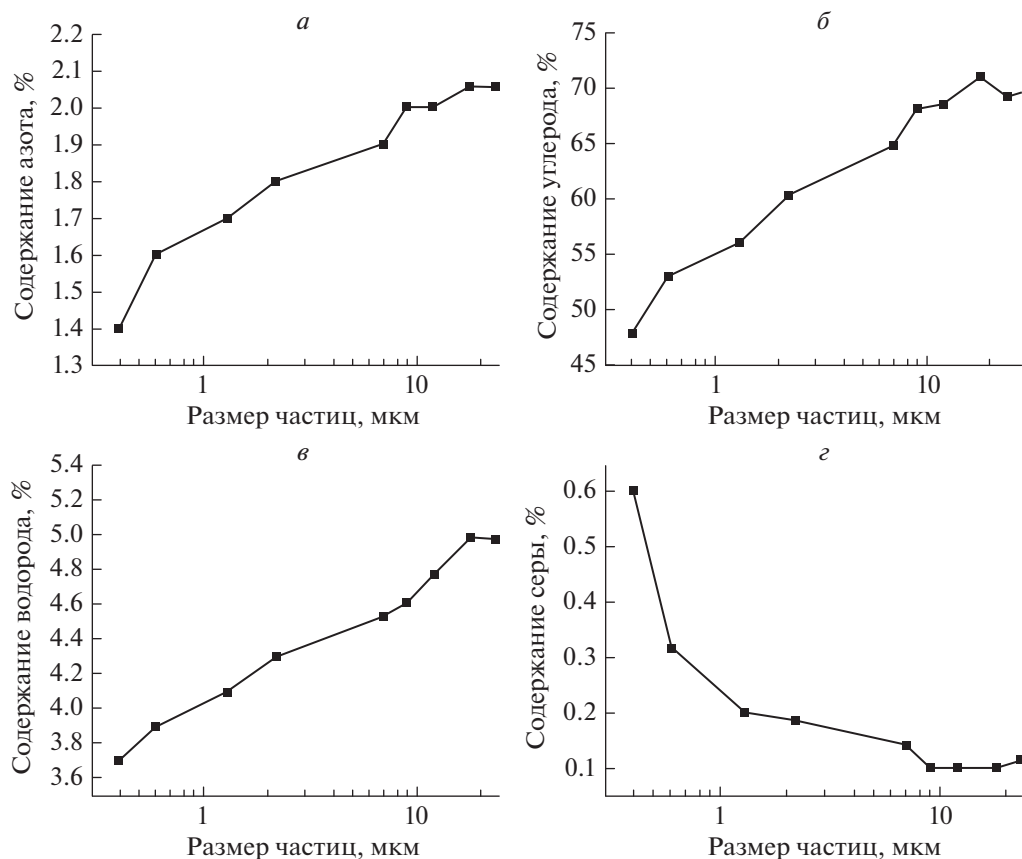


Рис. 7. Зависимость содержания азота (а), углерода (б) водорода (в) и серы (г) в общей массе угля марки “ДГ” от размеров частиц.

ствия двух противоположных тенденций в диапазоне размеров 1.2–9 мкм формируется минимум величины  $H_{cr}$  при  $d = 2.2$  мкм на всех трех стадиях. При уменьшении размеров ( $d < 2.2$ ) мкм преобладает вторая тенденция, т.е. увеличение величины зольности и уменьшение содержания углерода в частицах приводит к увеличению  $H_{cr}$  на всех трех стадиях зажигания. Из рис. 7 также видно, что в частицах размером менее 10 мкм уменьшается содержание азота, водорода, углерода и увеличивается содержание серы, что не противоречит предложенному выше объяснению зависимости  $H_{cr}(d)$ .

Таким образом, по данным, представленным на рис. 5, наиболее легко воспламеняемыми следует считать микрочастицы угольной пыли в диапазоне размеров 1–10 мкм. Частицы таких размеров должны считаться наиболее опасными при работе с угольной пылью в шахтах и угольных печах. Для безопасности работы персонала в шахтах следует разработать методы контроля угольной пыли именно этих размеров.

### ВЫВОДЫ

1. Отработана методика получения микрочастиц угля марки “ДГ” размерами в диапазоне 0.4–

33 мкм, включающая этапы механоактивации, мокрого рассеивания, центрифугирования и седиментации.

2. Кинетические характеристики зажигания исследованных образцов угля в различных узких диапазонах размеров по порядку величины практически совпадают с характеристиками зажигания образцов в широком диапазоне размеров.

3. Результаты технического и элементного анализов показывают, что содержание влаги и летучих веществ в угольных частицах практически не зависит от их размеров. При уменьшении размеров от 10 до 0.4 мкм в частицах возрастает величина зольности от 5% до 29% и уменьшается содержание углерода от 70% до 48%.

4. Установлено, что минимальные значения  $H_{cr}$  на всех трех стадиях зажигания имеют частицы размером  $d = 2.2$  мкм:  $H_{cr}^{(1)} = 0.2$  Дж/см<sup>2</sup>,  $H_{cr}^{(2)} = 0.8$  Дж/см<sup>2</sup>,  $H_{cr}^{(3)} = 1.8$  Дж/см<sup>2</sup>.

5. Минимум пороговых значений зажигания  $H_{cr}$  в исследованном диапазоне размеров угольных частиц формируется в результате двух тенденций – уменьшение размеров приводит к облегчению зажигания, т.е. уменьшению  $H_{cr}$ ; увеличение величин

ны зольности и уменьшение содержания углерода в частицах с уменьшением их размеров приводит к затруднению зажигания, т.е. увеличению  $H_{cr}$ .

6. При работе с угольной пылью следует учитывать, что при воздействии тепловых источников энергии наиболее легко воспламеняемыми являются частицы размерами  $d \approx 1-10$  мкм.

Авторы выражают благодарность А.Н. Заостровскому за предоставленные образцы углей, Н.И. Федоровой – за проведение технического анализа образцов.

Работа выполнена в рамках госзадания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН: проект 121031500513-4 (руководитель Адуев Б.П.), на оборудовании ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Phuoc T.X., Mathur M.P., Ekmann J.M.* // Combust. 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)
2. *Chen J.C., Taniguchi M., Narato K., Ito K.* // Ibid. 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)
3. *Taniguchi M., Kobayashi H., Auhata S.* // Proc. 26<sup>th</sup> Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1996. № 2. P. 3189; [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(96\)80164-0](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(96)80164-0)
4. *Taniguchi M., Okazaki H., Kobayashi H., Azuhata S., Miyadera H. et al.* // J. Energy Resour. Technol. 2001. V. 123. № 1. P. 32; <https://doi.org/10.1115/1.1347989>
5. *Коротких А.Г., Сорокин И.В., Селихова Е.А.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 7. С. 32; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20070080>
6. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Ковалев Р.Ю., Крафт Я.В., Зевков А.А. и др.* // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 9-2. С. 136.
7. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Белокуров Г.М., Нелюбина Н.В., Гудилин А.В.* // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 3. С. 522; <https://doi.org/10.7868/S0030403417020027>
8. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Белокуров Г.М., Нелюбина Н.В., Каленский А.В. и др.* // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 6. С. 45; <https://doi.org/10.7868/S0207401X17060024>
9. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.* // Химия в интересах устойчивого развития (Новосибирск). 2020. Т. 28. № 6. С. 535; <https://doi.org/10.15372/KhUR2020260>
10. *Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.* // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 3. С. 442; <https://doi.org/10.21883/OS.2020.03.49073.302-19>
11. *Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Нелюбина Н.В., Ковалев Р.Ю., Заостровский А.Н., Исмагилов З.Р.* // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 12. С. 47; <https://doi.org/10.7868/S0207401X16120025>
12. *Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Крафт Я. В., Исмагилов З.Р.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 3. С. 13; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22030025>
13. *Aduев В.Р., Kraft Y.V., Nurmukhametov D.R., Ismagilov Z.R.* // Combust. Sci. Technol.; <https://doi.org/10.1080/00102202.2022.2075699>
14. *Taniguchi M., Kobayashi H., Kiyama K., Shimogori Y.* // Fuel. 2009. V. 88. № 8. P. 1478.
15. *Yang Q, Peng Z.* // Interb. J. Hydrogen Energy. 2010. V. 35. № 10. P. 4715.
16. *Манжос Е.В., Коржавин А.А., Козлов Я.В., Намятов И.Г.* // Горение и взрыв. 2021. Т. 14. № 3. С. 98; <https://doi.org/10.30826/CE21140309>
17. *Валиулин С.В., Онищук А.А., Палеев Д.Ю. и др.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 4. С. 41; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21040130>