УДК 544.452.14, 543.429.23 DOI: 10.15372/KhUR2023491 EDN: FVHKCP

Влияние дисперсности угольных частиц на характеристики лазерного зажигания

Б. П. АДУЕВ, Д. Р. НУРМУХАМЕТОВ, Н. В. НЕЛЮБИНА, И. Ю. ЛИСКОВ, В. Д. ВОЛКОВ, З. Р. ИСМАГИЛОВ

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово (Россия)

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Аннотация

Исследовано зажигание фракций микрочастиц каменных углей марок ДГ, Г, Ж и К с узким распределением по размерам в диапазоне 0.25-44 мкм при воздействии лазерных импульсов (1064 нм, 120 мкс, 1.3 Дж). Измерены кинетические характеристики свечения образцов всего размерного ряда для каждой марки угля. Для каждой фракции выделено три стадии зажигания. Длительность первой стадии совпадает с длительностью лазерного импульса. Длительность второй занимает временной интервал 10-15 мс (угли ДГ, Г и Ж) и 3-5 мс (уголь К). Длительность третьей стадии – 60-80 мс (угли ДГ, Г и Ж) и 20 мс (уголь К). Установлено, что пороговые плотности энергии зажигания (порог зажигания) на всех трех стадиях немонотонно зависят от размеров частиц углей. Минимальные значения порогов зажигания на всех трех стадиях достигаются при размерах частиц, равных 2.2 (для угля марки ДГ), 4.0 (для угля марки Г), 0.7 (для угля марки Ж) и 2.0 мкм (для угля марки К). С использованием результатов технического анализа углей дана интерпретация наблюдаемым зависимостям критических плотностей энергии от размеров частиц углей.

Ключевые слова: уголь, лазерное зажигание, пороги зажигания, технический анализ углей

введение

Одной из важнейших характеристик каменных углей является минимальная энергия, при которой происходит их воспламенение. Знание этого параметра необходимо для разработки безопасных методов работы с угольными печами и в угольных шахтах [1-3]. Пороги воспламенения частиц углей зависят от их размеров (d). В связи с этим актуально исследование порогов зажигания (пороговые плотности энергии излучения ($H_{\rm cr}$)) микрочастиц угля в зависимости от их размеров.

Применение лазерных импульсов является удобным инструментом для исследования зажигания углей. Поглощение энергии лазерных импульсов вызывает нагрев частиц углей и их воспламенение, т. е. моделирует тепловой нагрев частиц в угольных печах и шахтах. Лазерные методы зажигания частиц углей в настоящее время используются достаточно широко [4–9]. Короткая длительность лазерных импульсов в сочетании с применением времяразрешающих методик для регистрации свечения пламен [10–12] позволяет изучать начальные этапы зажигания угольных частиц и получать новые данные для построения экспериментально обоснованных моделей зажигания.

Для исследования обычно применяются лазеры с длительностью импульса ~5 мс и угольные частицы с широким распределением по размерам [4–9]. В наших работах, выполненных в последнее время, для зажигания угольных частиц с размерами в диапазоне 0–63 мкм использовался неодимовый лазер ($\lambda = 1064$ нм) с более короткой длительностью импульсов ($\tau = 120$ мкс) [13–16]. Это позволило выделить три стадии зажигания, отличающиеся порогами

© Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Нелюбина Н. В., Лисков И. Ю., Волков В. Д., Исмагилов З. Р., 2023

зажигания *H*_{сг} и временными интервалами горения угольных частиц ряда метаморфизма от бурого угля до антрацита.

Первая стадия зажигания с наименьшим порогом H⁽¹⁾ наблюдается непосредственно во время воздействия лазерного импульса. Она связана с зажиганием реакционно-активных микровыступов на поверхности частиц с размерами ~1 мкм. При повышении плотности энергии излучения происходит зажигание всей поверхности частиц и прогрев их объема. При достижении второго порога зажигания $(H_{\rm cr}^{(2)})$ в объеме частиц инициируются термохимические реакции, выход и зажигание летучих веществ и углеродных частиц во временном интервале до 3-5 мс. При повышении плотности энергии до третьего порога $(H_{\rm cr}^{(3)})$ во временном диапазоне до 60-100 мс зажигание переходит в третью стадию, на которой инициируется другой тип термохимических реакций. На этом этапе в пламени наблюдается свечение углеродных частиц. Возможные механизмы зажигания предлагаются в [15].

Все исследования проводились с использованием углей с широким распределением частиц по размерам. Для практических целей необходима информация о размерах частиц, которые легче всего воспламеняются и являются опасными относительно инициирования воспламенения и взрыва угольной пыли.

В настоящей работе впервые исследованы кинетические и пороговые характеристики зажигания микрочастиц углей марок ДГ, Г, Ж и К в диапазоне размеров 0.25–44 мкм при воздействии лазерных импульсов (λ = 1064 нм, τ = 120 мкс, энергия 1.3 Дж).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

Исследовались каменные угли Кузнецкого бассейна (Россия) различных стадий метаморфизма – длиннопламенный газовый (ДГ), газовый (Г), жирный (Ж) и коксовый (К). Для получения частиц с относительно узким гранулометрическим распределением по размерам отработана методика, которая включает следующие этапы. Вначале производится помол крупных частиц углей (З мм) на шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 6 (Германия). Полученные частицы подвергались мокрому рассеиванию через вибрационное сито с размером ячеек 63 мкм для разделения слипшихся частиц. В результате получали фракции углей с широким распределением по размерам ($d \le 63$ мкм).

На следующем этапе частицы разделяли на более узкие фракции с помощью центрифуги MPW-340 (Польша). Для получения фракций с различными размерами использовали следующие скорости оборотов центрифуги: 3000, 2500, 2000, 1500 об/мин в течение 15 мин и 1000 об/мин в течение 10 мин. Неосажденная взвесь сливалась и сушилась при 95 °С. После центрифугирования осажденный осадок разделяли методом гравитационного осаждения (седиментация) на протяжении 40, 20 и 10 мин. Для измерения размеров частиц в полученных фракциях выполнялась микрофотосъемка на электронном микроскопе JOEL JSM-6390 LV (Япония). С использованием микрофотографий строились распределения частиц по размерам, которые включали 400-500 частиц. Для примера на рис. 1 представлены микрофотографии частиц угля Г для двух фракций: с размерами частиц в максимуме распределения 0.25 и 60 мкм, и построенные с их использованием гистограммы распределения частиц по размерам.

Аналогичным образом проводились измерения для полученных размерных рядов микрочастиц всех использованных углей. Значения размеров частиц *d* в максимумах распределений для всех исследованных марок углей представлены в табл. 1.

Для всех фракций проводился технический анализ на содержание влаги (W^a , %), летучих веществ (V^a , %) и зольности (A^a , %) в аналитической пробе угля (см. табл. 1). Погрешность измерения влажности, зольности и выхода летучих веществ составляет ±1.5 %.

В экспериментах использовались образцы с насыпной плотностью $\rho \approx 0.5$ г/см³, которые помещались в медный патрон диаметром 5 мм и глубиной 2 мм. Функциональная схема установки для измерения кинетических характеристик свечения и порогов зажигания фракций углей представлена в [15].

Для определения пороговых характеристик зажигания углей последовательно облучали десять образцов единичным импульсом лазера определенной энергии и регистрировали кинетическую зависимость свечения углей с помощью фотоумножителя.

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

где *п* – число зарегистрированных вспышек.



Рис. 1. Микрофотографии частиц угля марки Г (а, б) и соответствующие гистограммы их распределения по размерам (е, г).

Далее энергия излучения увеличивалась и эксперимент повторялся. В итоге измерялась зависимость вероятности появления вспышки от плотности энергии излучения лазера. Экспериментальные результаты аппроксимировались с использованием интегральной функции ошибок при помощи метода максимального правдоподобия:

$$P(H) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf}\left[\frac{H - H_{\rm cr}}{2\Delta H_{\rm cr}}\right] \right\}$$
(2)

где erf — функция ошибок; H — плотность энергии лазерного излучения; $H_{\rm cr}$ — плотность энергии, соответствующая 50%-й вероятности появления вспышки (порог зажигания); $\Delta H_{\rm cr}$ — среднеквадратичное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах использовались фракции угольных частиц с размерами в максимумах распределения, приведенных для каждой марки угля в табл. 1. В образцах всех исследованных марок для каждой из фракций обнаружено три стадии зажигания, которые характеризуются определенными пороговыми значениями $H_{\rm cr}$ и длительностями свечения (т, мс).

В качестве примера на рис. 2 представлены кинетические зависимости интенсивности свечения (U, B) угля марки Γ для фракций с размером частиц в максимуме распределения d = 4 мкм для трех стадий.

На врезках (см. рис. 2) приведены зависимости вероятности зажигания на соответствующей стадии от плотности энергии лазерного импульса (кривые частости), из которых можно определить три порога лазерного зажигания $H_{\rm cr}$, соответствующие различным процессам, протекающим в образцах. Значения порогов зажигания $H_{\rm cr}$ для всех размерных рядов углей марок ДГ, Г, Ж и К представлены в табл. 2. Погрешности измерений соответствуют значениям среднеквадратичного отклонения $\Delta H_{\rm cr}$ при аппроксимации кривых частости формулой (2).

На рис. 3 для примера представлены зависимости порогов зажигания $H_{\rm cr}$ на трех стадиях от размеров частиц для углей марок ДГ и К.

Марка угля	d, мкм	W ^a , %	Aª, %	V ^a , %	C ^a , 9
ДГ	33	4.7	3.5	41.2	50.6
	24	4.7	3.8	40.9	50.6
	18	4.0	3.5	44.3	48.2
	9	4.0	5.4	38.7	51.9
	2.2	4.2	15.2	40.3	40.3
	1.3	3.2	18.5	42.4	35.9
	0.6	3.2	23.2	37.2	36.4
	0.4	3.2	28.2	40.0	28.6
Г	27	1.3	2.9	40.1	55.7
	15	2.3	2.7	38.8	56.2
	9	2.3	2.5	39.4	55.8
	4.0	2.4	2.8	38.7	56.1
	0.95	2.5	1.9	39.4	56.8
	0.4	2.5	7.8	40.4	49.3
	0.25	4.3	17.1	44.3	34.3
ж	24	1.6	6.1	31.9	59.6
	18	1.5	7.1	31.8	57.7
	4.0	1.5	5.7	32.0	60.8
	1.3	1.3	4.8	30.0	63.9
	0.7	1.2	5.2	31.3	62.3
	0.5	1.2	5.7	35.6	57.5
К	44	2.0	3.8	22.6	71.6
	7.4	0.9	3.4	23.3	72.5
	2.0	1.2	3.7	23.5	71.6

ТАБЛИЦА 1

Примечание. W^a — массовая доля влаги в аналитической пробе; A^a — зольность аналитической пробы; V^a — выход летучих веществ аналитической пробы; C^a — массовая доля нелетучего углерода в аналитической пробе; *d* — размер частиц угля.

8.2

11.9

23.8

23.9

67.5

63.3

0.5

0.9

0.7

0.5

Для всех исследованных марок углей выявлена немонотонная зависимость H_{cr} от d для всех трех стадий. Установлено, что для конкретной марки угля минимальные значения H_{cr} на различных стадиях зажигания достигаются при одинаковых размерах частиц угля: для марки ДГ – d = 2.2 мкм, Г – d = 4.0 мкм, Ж – d = 0.7 мкм, К – d = 2.0 мкм. Для размеров частиц более или менее указанных наблюдается рост H_{cr} . Диапазон размеров наиболее легко воспламеняемых частиц можно определить как $d \approx (1-10)$ мкм.

Для интерпретации экспериментальных результатов воспользуемся данными технического анализа углей марок ДГ, Г, Ж и К (см. табл. 1).

Уголь марки ДГ. Содержание влаги W^a и летучих веществ V^a слабо зависит от размеров частиц. Зольность $A^a \approx 4 \%$ постоянна для об-



Рис. 2. Кинетические зависимости интенсивности свечения (U, B) угля марки Γ для фракции с размером в максимуме распределения d = 4.0 мкм для трех стадий зажигания: $H_{\rm cr}^{(1)} = 0.4 \, \text{Дж/см}^2$ (а); $H_{\rm cr}^{(2)} = 0.8 \, \text{Дж/см}^2$ (б); $H_{\rm cr}^{(1)} = 2.5 \, \text{Дж/см}^2$ (в). На вставках: зависимости вероятности зажигания (P) угля марки Γ от плотности энергии лазерного излучения (H).

ТАБЛИЦА 2		
Значения порогов зажигания ($H^i_{ m en}$) для всех размерных рядов углей марок ДГ, Г, $ m 3$	КиК	

Марка угля	<i>d</i> , мкм	H^1_{cr} , Дж/см 2	ΔH^1_{cr}	H^2_{cr} , Дж/см ²	ΔH_{cr}^2	H_{cr}^3 , Дж/см 2	ΔH_{cr}^3
ДГ	0.4	0.25	0.03	1.00	0.10	2.50	0.15
	0.6	0.22	0.03	0.95	0.12	2.20	0.17
	1.3	0.22	0.02	0.85	0.10	1.80	0.10
	2.2	0.20	0.02	0.80	0.13	1.80	0.15
	7	0.25	0.03	0.95	0.13	2.30	0.20
	9	0.30	0.02	1.00	0.15	2.30	0.25
	12	0.35	0.03	1.25	0.10	2.30	0.20
	18	0.35	0.02	1.30	0.13	2.40	0.15
	24	0.37	0.02	1.45	0.11	2.50	0.20
	33	0.40	0.02	1.50	0.13	4.00	0.30
	54	0.40	0.02	1.60	0.12	_	-
Г	0.25	0.47	0.03	1.3	0.07	3.8	0.20
	0.4	0.45	0.03	1.20	0.08	3.20	0.20
	0.95	0.47	0.02	1.10	0.10	3.00	0.25
	4.0	0.40	0.03	0.80	0.11	2.50	0.20
	9	0.45	0.02	1.30	0.09	3.00	0.15
	15	0.45	0.02	1.60	0.10	3.50	0.20
	27	0.48	0.03	1.75	0.11	4.20	0.25
	40	0.50	0.03	1.85	0.12	_	-
ж	0.5	0.30	0.03	0.80	0.05	3.80	0.20
	0.7	0.30	0.03	0.75	0.06	3.50	0.15
	1.3	0.30	0.03	0.90	0.06	4.00	0.30
	4.0	0.35	0.03	1.20	0.07	4.80	0.40
	18	0.35	0.03	1.40	0.07	5.50	0.40
	24	0.40	0.04	1.40	0.08	8.00	0.60
	40	0.40	0.04	1.30	0.05	_	-
К	0.48	0.5	0.03	0.95	0.10	8.3	0.20
	0.72	0.45	0.04	0.9	0.09	6.2	0.15
	0.8	0.40	0.03	0.80	0.08	6.00	0.20
	1.15	0.37	0.02	0.55	0.08	5.30	0.25
	1.57	0.35	0.03	0.50	0.07	5.00	0.20
	2.0	0.35	0.03	0.50	0.08	5.10	0.15
	7.4	0.40	0.02	0.75	0.09	5.50	0.20
	21	0.40	0.02	0.80	0.10	7.00	0.30
	43.6	0.40	0.03	0.90	0.09	12.00	0.25
	53.7	0.40	0.02	0.95	0.09	-	-

 $\varPi p$ азмер частиц угля; $H^i_{\rm cr}$ — порог зажигания i-й стадии; $\Delta H^i_{\rm cr}$ — среднеквадратичное отклонение.

разцов с размерами частиц $d \ge 10$ мкм. При уменьшении размеров частиц (d < 10 мкм) зольность A^a монотонно возрастает до ~28 % (для образцов с размерами частиц d = 0.4 мкм). В этом же диапазоне размеров падает содержание углерода C^a в частицах с 50.6 до 28.6 % (см. табл. 1).

Сравнение пороговых характеристик и данных технического анализа позволяет дать следующую интерпретацию зависимости $H_{\rm cr}$ от размеров частиц. При уменьшении размеров частиц от максимальных до 10 мкм при постоянных технических параметрах требуется меньше энергии для их зажигания, что приводит к уменьшению $H_{\rm cr}$ (см. рис. 3). При d < 10 мкм увеличивается содержание золы и уменьшается содержание углерода в частицах, что должно способствовать ухудшению зажигания частиц, т. е. росту $H_{\rm cr}$. В результате двух противоположных тенденций формируется минимум на зависимости $H_{\rm cr}(d)$ при d = 4 мкм (см. рис. 3).

При меньших значениях *d* начинает преобладать вторая тенденция (рост A^a и уменьше-



Рис. 3. Зависимости порогов зажигания (H_{cc}) от размеров частиц (d) углей марок ДГ (a) и К (б) на трех стадиях зажигания.

ние C^a) и H_{cr} возрастает на всех трех стадиях (см. табл. 2). Таким образом, минимальное значение H_{cr} достигается, когда влияние уменьшения размеров компенсируется возрастанием зольности и уменьшением содержания углерода в частицах.

Уголь марки Г. Согласно табл. 1 значения содержания влаги W^a и летучих веществ V^a с учетом погрешности измерений незначительно варыруются для всех размеров частиц. Зольность и содержание углерода незначительно изменяются в диапазоне размеров частиц 4–60 мкм. При уменьшении размеров d < 4 мкм зольность возрастает с 2.8 до ~17 %. В этом же диапазоне падает содержание углерода, но менее выраженно.

Следовательно, с уменьшением размеров частиц при постоянных значениях A^a и C^a уменьшается $H_{\rm cr}$. При d < 4 мкм повышение зольности и уменьшение содержания углерода в частицах приводит к возрастанию $H_{\rm cr}$ (см. табл. 2).

Уголь марки Ж. Для данной марки угля значения содержания влаги W^a, зольности A^a и летучих веществ V^a слабо изменяются для различных размеров частиц до 0.7 мкм. При d = 0.5 мкм наблюдается небольшое увеличение содержания золы и уменьшение содержания углерода (см. табл. 1). При этом понижается $H_{\rm cr}$ во всем диапазоне с уменьшением размеров частиц до 0.7 мкм с последующим небольшим увеличением $H_{\rm cr}$ для d = 0.5 мкм (см. табл. 2).

Уголь марки К. Для данной марки угля содержание влаги W^a и летучих веществ V^a постоянно для всех размеров частиц (см. табл. 1). Зольность A^a и содержание углерода C^a в частицах постоянны в диапазоне размеров 44–2 мкм. Для частиц с размерами 2–0.5 мкм зольность возрастает с 3.7 до 11.9 %, соответственно, падает содержание углерода с 71.6 до 63.3 % (см. табл. 1).

Исходя из этих данных, можно построить следующие интерпретации зависимости $H_{\rm cr}(d)$ (см. рис. 3). При уменьшении размеров частиц от максимальных до 2 мкм снижаются критичес-кие плотности энергии $H_{\rm cr}^{(2)}$ и $H_{\rm cr}^{(3)}$, т. е. оказывает влияние именно размерный фактор. А при дальнейшем уменьшении частиц оказывает влияние увеличение зольности и уменьшение содержания углерода в частицах. Уменьшение $H_{\rm cr}^{(1)}$ начинается только при d < 8 мкм, что, по-видимому, связано с особенностями зажигания поверхности данной марки угля (первая стадия).

В диапазоне d < 2 мкм на $H_{\rm cr}$ на всех трех стадиях в большей степени оказывает влияние увеличение зольности и уменьшение содержания углерода в частицах. Это и приводит к возрастанию $H_{\rm cr}$ (см. рис. 3).

В работе [15] исследована зависимость порогов зажигания каменных углей от содержания углерода и летучих веществ с использованием образцов углей с широким гранулометрическим распределением.

Интересно было провести сравнение этих зависимостей для узких фракций частиц, полученных в данной работе.

На рис. 4 представлены зависимости $H_{\rm cr}$ от содержания летучих веществ в исследованных

марках углей при разных размерах частиц: близких к минимальным, d = 0.5 мкм (*a*); близких к максимальным, d = 25 мкм (*в*); и при которых $H_{\rm cr}$ близки к минимальным значениям (б).

Как следует из полученных данных, тенденции зависимостей $H_{\rm cr}$ от содержания летучих веществ на всех трех стадиях качественно аналогичны наблюдаемым в экспериментах с использованием частиц с широким распределением по размерам [15]. В связи с этим не возникает необходимости в усложнении интерпретации процессов зажигания угля в ряду метаморфизма при изменении размеров частиц.

выводы

1. Отработана методика получения микрочастиц каменных углей с узким гранулометрическим распределением (d = (0.25-44) мкм), включающая этапы помола на шаровой мельнице, мокрого рассеивания, центрифугирования и седиментации.

2. Проведен технический анализ для всех размерных рядов образцов углей марок ДГ, Г, \mathcal{K} и К.

3. Измерены кинетические характеристики интенсивности свечения и порогов зажигания при воздействии лазерных импульсов для всех размерных рядов частиц углей марок ДГ, Г, Ж и К.

4. Установлено, что зависимость $H_{\rm cr}$ от размеров частиц на всех трех стадиях зажигания определяется двумя тенденциями. Во-первых, уменьшение размеров частиц от максимальных до $d \approx 10$ мкм приводит к снижению порогов зажигания. Во-вторых, в углях марок ДГ и Г при значениях $d \leq 10$ мкм, а в угле марки К при $d \leq 2$ мкм наблюдается увеличение зольности и уменьшение содержания углерода в частицах, что приводит к росту пороговых значений.

В результате действия двух тенденций формируется минимум порогов зажигания в диапазоне размеров частиц 1–10 мкм: для угля марки ДГ – при d = 2.0 мкм, для угля марки Г – при d = 4.0 мкм, для угля марки К – при d = 2 мкм. Для угля марки Ж величина $H_{\rm cr}$ снижается с уменьшением размеров частиц до 0.7 мкм. При d = 0.5 мкм наблюдается небольшой рост $H_{\rm cr}$ и увеличение зольности.

5. Зависимости порогов зажигания частиц различных размеров с узким гранулометрическим распределением для углей марок ДГ, Г, Ж и К от содержания летучих веществ имеет качественно аналогичный характер, полученный



Рис. 4. Зависимость порогов зажигания $(H_{\rm cr})$ от содержания летучих веществ (V^a) в образцах исследованных марок углей с разными размерами частиц (d) в максимуме распределения: d = 0.5 мкм (a); d = 4 мкм (б); d = 25 мкм (s).

на образцах с широким распределением частиц по размерам.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института углехимии и химического материаловедения ФИЦ УУХ СО РАН (проект № 121031500513-4) на оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ УУХ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 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.
- 2 Yang Q., Peng Z. Characteristics of plasma induced by interaction of a free-oscillated laser pulse with a coal target in air and combustible gas // Int. J. Hydrogen Energy. 2010. Vol. 35, No. 10. P. 4715-4722.
- 3 Pogodaev V. A. Coal particles in intense laser beams // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1984. Vol. 20, No. 1. P. 46-50.
- 4 Chen J. C., Taniguchi M., Narato K., Ito K. Laser ignition of pulverized coals // Combust. Flame. 1994. Vol. 97, No. 1. P. 107-117.
- 5 Воробьев А. Я., Либенсон М. Н. Сжигание твердого топлива лазерным импульсом // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16, № 19. С. 79–83.
- 6 Dodoo J. N. D., Ochran A. R. Swelling of coal particles irradiated with well-characterized laser pulses // Fuel. 1994. Vol. 73, No. 5. P. 773-778.
- 7 Norman F., Berghmans J., Verplaetsen F. The minimum ignition energy of coal dust in an oxygen enriched atmosphere // Chem. Eng. Transact. 2013. Vol. 31. P. 739-744.
- 8 Кузиковский А. В., Погодаев В. А. О горении твердых аэрозольных частиц под действием излучения СО₂-лазера // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 5. С. 783–788.

- 9 Qu M., lshigaki M., Tokuda M. Ignition and combustion of laser-heated pulverized coal // Fuel. 1996. Vol. 75, No. 10. P. 1155-1160.
- 10 Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Ковалев Р. Ю., Крафт Я. В., Звеков А. А., Каленский А. В. Спектрально-кинетические закономерности лазерного инициирования композитов тэна с наночастицами металлов и угля // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 9-2. С. 136-139.
- 11 Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звеков А. А., Лисков И. Ю. Влияние размера включений ультрадисперсных частиц никеля на порог лазерного инициирования тэна // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 4. С. 82-86. DOI 10.15372/FGV20150411.
- 12 Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Нелюбина Н. В., Каленский А. В., Алукер Н. Л. Спектральнокинетические характеристики свечения начального этапа взрывчатого разложения композитов на основе тэна с включениями наночастиц металлов при лазерном инициировании // Хим. физика. 2017. Т. 36, № 6. С. 45-51.
- 13 Адуев Б. П., Крафт Я. В., Нурмухаметов Д. Р., Исмагилов З. Р. Зажигание углей различных стадий метаморфизма лазерными импульсами в режиме свободной генерации // Химия уст. разв. 2019. Т. 27, № 6. С. 549–555.
- 14 Адуев Б. 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.
- 15 Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Крафт Я. В., Исмагилов З. Р. Энергетические характеристики зажигания и кинетика свечения пламен дисперсных частиц углей различных стадий метаморфизма при воздействии лазерных импульсов // Химия уст. разв. 2020. Т. 28, № 6. С. 535–543.
- 16 Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Крафт Я. В., Исмагилов З. Р. Спектральные характеристики свечения поверхности частиц каменных углей во время воздействия лазерных импульсов в режиме свободной генерации // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128, № 12. С. 1898–1904.