ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 543.42; 544.452.1

НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ ЗАЖИГАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

© 2022 г. Б. П. Адуев^{1*}, Д. Р. Нурмухаметов¹, Я. В. Крафт¹, З. Р. Исмагилов^{1, 2}

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, Кемерово, Россия ²Федеральный исследовательский центр "Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук", Новосибирск, Россия

**E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru* Поступила в редакцию 28.04.2021; после доработки 17.05.2021; принята в печать 20.05.2021

Исследованы спектры свечения частиц углей размером ≤63 мкм в ряду метаморфизма от длиннопламенного до антрацита во время воздействия лазерного импульса ($\tau_i = 120$ мкс). Пороговое зна-

чение плотности импульса лазера, $H_{cr}^{(1)}$, при котором становится возможным обнаружение свечения частиц углей приборами, связано с зажиганием реакционно-активных микровыступов на поверх-

ности частиц углей. При плотности энергии $H = H_{cr}^{(2)}$ происходит нагрев поверхности частиц углей, достаточный для возбуждения химических реакций в их объеме, выхода и зажигания летучих ве-

ществ по гетерогенному механизму зажигания. При увеличении плотности энергии до $H > H_{cr}^{(3)}$ хи-

мические процессы в частицах угля аналогичны процессам, протекающим при $H = H_{cr}^{(2)}$, но с ростом H возрастает интенсивность свечения и, следовательно, скорость химических реакций в частицах угля уже во время воздействия лазерного импульса. В спектры на всех стадиях зажигания вносят вклады свечения CO₂^{*} (пламя CO), возбужденных молекул H₂^{*} и H₂O^{*} и раскаленных частиц угля (либо смолы), что характерно для всех исследованных марок углей. Интегральная по спектру яркость свечения частиц углей во время воздействия лазерного импульса возрастает в ряду метамор-физма практически линейно.

Ключевые слова: уголь, спектры свечения, лазер, зажигание, пороги зажигания, стадии зажигания. **DOI:** 10.31857/S0207401X22030025

введение

Для детального понимания процессов зажигания угольного топлива необходимо изучение первичных процессов воспламенения частиц угля, протекающих на начальных стадиях зажигания. Такие знания необходимы для построения адекватной теории зажигания и горения углей, которая, несмотря на большое количество работ (см., например, [1, 2]), до сих пор не создана. Кроме того, изучение процессов воспламенения частиц углей под действием тепловых источников позволит разработать методы предотврашения взрывов угольной пыли в шахтах. К примеру, в работе [3] проведено исследование влияния аэрозоля, состоящего из частиц углей и выделяющихся из них высокомолекулярных соединений, на предел воспламенения метановоздушной смеси. Исследование процессов воспламенения топлив может быть осуществлено с помощью метода импульсного фотолиза. Например, в работе [4] проведено исследование воздействия излучения импульсной ксеноновой лампы на зарождение и разветвление цепей в гремучей смеси вблизи предела воспламенения. В качестве мощного теплового источника весьма удобно использовать импульсные лазеры, излучение которых нагревает частицы топлива, вызывая их воспламенение [5, 6]. При этом изучение процессов воспламенения частиц угля облегчается из-за возможности удаления источника нагрева от объекта исследования, визуального наблюдения и применения электронно-оптических методов регистрации спектрально-кинетических характеристик свечения нагретых частиц и пламен с высоким временным разрешением [6-8].

Изучение лазерного зажигания углей начато относительно давно. Имеется большое число работ с использованием СО₂-лазеров, работающих

таолица 1. гезультаты технического анализа углей									
	Технический анализ, %								
Проба, марка угля		A^d	<i>V^{daf}</i>						
Проба № 72, марка Д, р-з "Камышанский", Северо-Талдинское м-е, пласт 73	7.6	6.2	44.5						
Проба № 64, марка ДГ, шахта им. В.Д. Ялевского, пласт № 52	5.7	4.7	42.6						
Проба № 40, марка Г, шахта им. Кирова, пласт Поленовский	1.2	3.3	40.4						
Проба № 15, марка Ж, шахта "Тихова", пласт № 23	0.8	7.8	33.3						
Проба № 10, марка К, ООО "Участок Коксовый", пласт II внутренний	0.6	4.9	21.3						
Проба № 34, марка ОС, р-з "Томусинский"	0.1	6.7	19.8						
Проба № 45, марка СС, р-з "Бачатский"	1.3	4.7	19.0						
Проба № 81, марка Т, АО "Кузнецкинвестстрой", пласт 19а	0.5	6.2	14.4						
Проба № 33, марка А, р-з "Бунгурский"	0.4	3.6	7.7						

Таблица 1. Результаты технического анализа углей

Примечания: W^a – влага аналитическая, *A^d* – зольность, *V^{daf}* – выход летучих веществ; р-з – разрез, м-е – месторождение.

в непрерывном режиме, и неодимовых лазеров с длительностью импульса в миллисекундном временном интервале [8–13].

В настоящее время считается, что в результате поглощения лазерного излучения частицей угля происходят нагрев ее поверхности, радиационные потери и конвекция тепла. В результате поглощенная энергия перераспределяется по объему частицы угля, что приводит к уменьшению температуры поверхностных слоев частицы угля и выравниванию температуры по ее объему. Если поглощенная энергия достаточно велика, происходят выход и зажигание летучих веществ [8]. Логично предположить, что при дальнейшем увеличении плотности энергии импульса лазера воспламеняется нелетучий остаток частицы угля.

В наших работах [14-17] установлено, что зажигание частиц угля лазерным импульсом происходит также в три стадии, которые имеют характерные пороги зажигания: $H_{cr}^{(1)}$, $H_{cr}^{(2)}$ и $H_{cr}^{(3)}$. Каждая из стадий протекает в определенном временном интервале. Для всех образцов углей длительность свечения на первой стадии зажигания соответствует длительности лазерного импульса. На второй стадии зажигания, при достижении значения плотности энергии, соответствующего $H_{cr}^{(2)}$, характерного для каждой марки угля, помимо свечения во время лазерного импульса, наблюдается свечение образцов во временном интервале ~1 мс. При достижении значения плотности энергии лазерного импульса, соответствующего $H_{cr}^{(3)}$, характерного для каждой марки угля, помимо свечения, свойственного для первой и второй стадий зажигания, регистрируется свечение образцов во временном интервале ≥10 мс. Предложены первые модели процессов, которые требуют более подробного обоснования. Первая стадия, которая начинается во время импульса облучения, в литературе не

рассматривалась, хотя начальные процессы зажигания частицы угля при лазерном воздействии должны играть значительную роль для развития последующих химических реакций.

Такое рассмотрение начато в нашей работе [18] с использованием каменных углей Кузнецкого угольного бассейна: длиннопламенного газового (ДГ), газового (Г), жирного (Ж), коксового (К). В настоящей работе это исследование продолжено. Расширен круг объектов. Помимо перечисленных марок углей исследованы еще следующие марки: длиннопламенный (Д), отощенный спекающийся (ОС), слабоспекающийся (СС), тощий (Т), антрацит (А). Таким образом, ряд метаморфизма представлен достаточно широко. Исследованы спектры свечения вблизи поверхности частиц углей, возникающие непосредственно во время воздействия лазерных импульсов. Исследованы зависимости трансформации спектров и амплитуды интегрального по спектру свечения от плотности энергии лазерных импульсов.

Образцы и методика

В работе использовались образцы углей Кузнецкого угольного бассейна, перечисленные во Введении. Помол углей проводили на шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 6. После измельчения частицы угля просеивались через вибрационное сито с размером ячеек 63 мкм. Результаты технического анализа аналитических проб углей приведены в табл. 1.

Элементный состав образцов углей выполнен на автоматическом элементном анализаторе содержания C, H, N, S, O "Flash 2000". Результаты анализа, рассчитанные на органическую массу угля (OMУ), представлены в табл. 2. Использовались образцы углей с насыпной плотностью $\rho_{bulk} = (0.50 \pm 0.02)$ г/см³ и массой 20 мг, которые

2022

Nº 3

Марка угля	С, %	Н, %	N, %	S, %	О,% (по разности)				
Д	74.4	5.3	2.3	0.5	17.5				
ДГ	74.3	5.3	2.3	0.3	17.7				
Γ	81.3	5.8	3.1	0.2	9.6				
Ж	80.2	5.2	3.0	0.4	11.2				
Κ	87.7	4.6	2.2	0.4	5.1				
OC	84.8	4.2	2.0	0.3	8.7				
CC	83.8	4.0	2.1	0.1	10.0				
Т	89.7	4.1	2.0	0.4	3.8				
А	89.6	3.3	1.8	0.4	4.9				

Таблица 2. Результаты элементного анализа образцов углей (на ОМУ)

помещались в медный капсюль диаметром 5 мм и глубиной 2 мм.

Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался YAG:Nd³⁺-лазер, работающий в режиме свободной генерации на длине волны $\lambda = 1064$ нм с длительностью импульса $\tau_i = 120$ мкс и энергией в импульсе до W = 1 Дж (см. рис. 1). Плотность энергии лазерного импульса регулировалась с использованием калиброванных нейтральных светофильтров *I* (рис. 1). С помощью линзы *3* с фокусным расстоянием 25 см и поворотного зеркала *4* излучение лазера фокусировалось на образец угля *5*. Схема регистрации



Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки: *1* – нейтральные светофильтры, *2* – светоделительная пластина, *3*, *6*, *7*, *9* – линза, *4* – поворотное зеркало, *5* – образец угля, *8* – пространственновременная щель, *10* – осциллограф; Л – YAG:Nd³⁺лазер, ПП – пироэлектрический приемник, ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, К – компьютер, Г – генератор имульсов, СФХ – спектрофотохронограф, СК – фотохронограф, П – полихроматор.

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА том 41 № 3 2022

имела два канала. Для регистрации интегрального по спектру свечения изображение образца с помощью линзы 6 передавалось на фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) Hamamatsu H10721-01. Временно́е разрешение фотоумножителя составляло 0.5 нс. Сигнал с ФЭУ регистрировался осциллографом LeCroy WJ332A *10* и передавался в компьютер (рис. 1).

Второй канал предназначен для измерения спектрально-кинетических характеристик свечения образца угля, возникающего во время воздействия лазерного импульса в режиме реального времени. Образец 5 (рис. 1) располагался под углом 45° к лазерному излучению и оптической оси второго измерительного канала. Изображение образца с помощью линзы 7 (рис. 1) передавалось в плоскость пространственно-временной щели 8 (рис. 1). На рис. 1 для наглядности щель развернута на 90°. Щель имела размер 0.2×0.1 мм и определяла пространственное и временное разрешение регистрирующей системы. Изображение щели с помощью линзы 9 (рис. 1) строилось на входе полихроматора, входящего в состав спектрофотохронографа (СФХ). Полихроматор разлагал свечение образца в спектр в диапазоне длин волн 350-750 нм. Полоска спектра с помощью фотохронографа "CX1-A", работающего в режиме линейной развертки (стрик-камеры), разворачивалась во времени. Световая матрица с выходного экрана спектрофотохронографа считывалась с использованием ПЗС-матрицы¹⁾ и передавалась на запоминающее устройство в компьютер для последующей цифровой обработки. По горизонтальным строкам матрицы можно получить зависимость интенсивности свечения исследованного образца от времени на определенной длине волны, по вертикальным столбцам – спектр свечения образца в фиксированный момент времени от начала лазерного импульса. Спектральное разрешение составляло 10 нм, временное разрешение определялось

¹⁾ ПЗС – прибор с зарядовой связью.

АДУЕВ и др.

Проба, марка угля	H ⁽¹⁾ _{cr} , Дж/см ²	<i>H</i> ⁽²⁾ _{cr} , Дж/см ²	H _{cr} ⁽³⁾ , Дж/см ²
Проба № 72, марка Д, р-з "Камышанский", Северо-Талдинское м-е, пласт 73	0.51 ± 0.09	2.4 ± 0.1	3.1 ± 0.3
Проба № 64, марка ДГ, шахта им. В.Д. Ялевского, пласт № 52	0.39 ± 0.05	1.6 ± 0.3	2.4 ± 0.4
Проба № 40, марка Г, шахта им. Кирова, пласт Поленовский	0.45 ± 0.04	1.9 ± 0.2	3.3 ± 0.2
Проба № 15, марка Ж, шахта "Тихова", пласт № 23	0.47 ± 0.04	1.1 ± 0.1	5.5 ± 0.5
Проба № 10, марка К, ООО "Участок Коксовый", пласт II внутренний	0.35 ± 0.04	0.9 ± 0.1	7.0 ± 0.4
Проба № 34, марка ОС, р-з "Томусинский"	0.49 ± 0.05	1.1 ± 0.1	7.5 ± 0.8
Проба № 45, марка СС, р-з "Бачатский"	0.46 ± 0.04	1.0 ± 0.1	7.9 ± 0.8
Проба № 81, марка Т, АО "Кузнецкинвестстрой", пласт 19а	0.38 ± 0.09	0.9 ± 0.1	8.5 ± 1.1
Проба № 33, марка А, р-з "Бунгурский"	0.41 ± 0.07	1.10 ± 0.05	9.3 ± 1.1

Таблица 3. Пороги зажигания исследованных марок углей

применяемой разверткой и составляло 2 мкс, что вполне достаточно при длительности импульса лазера 120 мкс. Синхронный запуск лазера и развертки фотохронографа осуществлялся с помощью генератора Г5-56 (рис. 1). Калибровку спектральной чувствительности измерительного тракта проводили с использованием метода эталонной лампы накаливания ТРШ-2850-3000 [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования спектров свечения во время воздействия лазерных импульсов при различных плотностях энергии H выбраны обнаруженные ранее (см. Введение) плотности энергии H_{cr} , имеющие ключевое значение для процесса зажигания. Пороговые значения плотности энергии лазерного излучения для использованных частиц углей измерены в наших предыдущих работах [15–17] и представлены в табл. 3.

На рис. 2 представлены спектры свечения частиц углей в ряду метаморфизма при воздействии

импульса лазера с плотностью энергии $H = H_{cr}^{(1)}$. При такой плотности энергии начинает обнаруживаться свечение частиц углей, которое можно зарегистрировать приборами. При этом над образцом появляется визуально наблюдаемое пламя высотой ≤ 1 мм.

В работе [20], так же как и в нашей предыдущей работе [14], считалось, что порогу обнаружения соответствует свечение нагретой поверхности частиц углей до выхода и зажигания летучих веществ. Следовательно, при плотности энергии $H = H_{cr}^{(1)}$ должны наблюдаться спектры теплового свечения. Тем не менее при данных плотностях энергии тепловые спектры отсутствуют во всем ряду метаморфизма. Регистрируемые спектры не являются элементарными, их форма может изменяться при последовательном облучении образца лазерными импульсами. В работе [21] был сделан вывод о том, что первоначальным процессом при лазерном зажигании частицы угля может быть зажигание микровыступов на ее поверхности. При поглощении лазерной энергии микровыступы нагреваются быстрее, чем поверхность частицы угля, что должно привести к их зажиганию. Для подтверждения этого вывода был проведен следующий эксперимент. Частица угля марки Ж размером 0.4 × 0.4 мм облучалась импульсом лазера

с плотностью энергии $H = H_{cr}^{(1)}$, и с помощью оптического микроскопа делался снимок видеокамерой (рис. 3*a*). На снимке наблюдаются точки размером $d \ge 1$ мкм, что соответствует зажиганию микровыступов на поверхности частицы угля. При облучении частицы угля импульсом с плотностью энергии $H = H_{cr}^{(2)}$ наблюдаются свечение всей поверхности частицы и лучи пламени (рис. 3*6*).

Длительность свечения образцов всех марок углей при $H = H_{cr}^{(1)}$ совпадает с длительностью импульса лазера, а тонкая структура совпадает с пичковой структурой лазерного импульса в режиме свободной генерации, о чем свидетельствуют данные рис. 4.

Анализ табличных молекулярных спектров [22, 23] позволяет сделать вывод о том, что спектры свечения, представленные на рис. 2, могут быть связаны с воспламенением на воздухе окиси углерода, соответствующем реакции

$$2CO + O_2 = 2CO_2, \tag{1}$$

и свечением возбужденных молекул H_2^* и H_2O^* .



Рис. 2. Спектры свечения образцов углей в ряду метаморфизма при воздействии лазерных импульсов с плотностью энергии $H = H_{cr}^{(1)}$. Штриховые линии соответствуют тепловой составляющей при T = 3100 K.

Пламя горения СО имеет сплошной спектр с пичковой структурой в диапазоне длин волн 300– 500 нм [22, 23]. Свечение возбужденных молекул H_2O^* наиболее интенсивно в ИК-области спектра. Тем не менее интенсивное свечение наблюдается также в диапазоне 550–730 нм [22, 23]. Свечение возбужденных молекул H_2^* , так называемый "второй спектр водорода", наблюдается в диапазоне 400–730 нм [22, 23]. Наблюдается в диапазоне 52, 23]. Наблюдается в диапазоне 400–730 нм [22, 23]. Наблюдается в диапазоне 400–730 нм [22, 23]. Наблюдается суперпозицией трех видов спектров. Эти продукты идентифицированы ранее на второй стадии зажигания частиц бурого угля (t > 0.5 мс) в спектрах свечения летучих веществ [14]. Из вышесказанного следует, что процессы, протекающие при воздействии лазерных импульсов в режиме свободной генерации на частицы угля с плотностью энергии $H = H_{cr}^{(1)}$, можно представить следующим образом. В отдельном пичке с длительностью ~10 мкс интенсивность достаточно высока для нагрева и окисления углерода на микровыступах частицы угля кислородом воздуха по реакции

$$2C + O_2 = 2CO.$$
 (2)

Образовавшаяся окись углерода вследствие высокой температуры микровыступа воспламеняется по реакции (1). Другой вариант — на мик-

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА том 41 № 3 2022





Рис. 3. Микрофотографии свечения частицы угля марки Ж размером 0.4×0.4 мм при воздействии импульса лазера с различными плотностями энергии: $a - H = H_{cr}^{(1)}, \ 6 - H = H_{cr}^{(2)}.$

ровыступе в результате его нагрева происходит процесс, соответствующий второй стадии зажигания, т.е. из него выходят летучие продукты, при этом СО сразу воспламеняется. В любом случае пламя горения СО перекрывает доступ кислорода воздуха к микровыступу, и он гаснет, в результате чего наблюдается пичковая структура пламени, повторяющая структуру лазерного импульса.

На рис. 5 представлены спектры свечения образцов углей в ряду метаморфизма в момент воздействия лазерного импульса с плотностью энергии $H = H_{cr}^{(2)}$. В этом случае осуществляется нагрев поверхности частиц углей до температуры воспламенения (рис. 36). Визуально над поверхностью образцов наблюдается пламя высотой до 3–5 мм. Спектры свечения не элементарны. В них присутствуют те же составляющие, что и описанные



Рис. 4. Осциллограмма свечения пламени частиц угля марки Ж, измеренная при значениях плотности энергии излучения лазера $H = H_{cr}^{(1)}$.

ранее при интерпретации экспериментальных данных рис. 2 при $H = H_{cr}^{(1)}$, которые в результате нагрева образца и последующих термохимических превращений выходят из частиц угля и дают различные вклады в наблюдаемые спектры свечения. Кроме того, вклад в свечение может давать нагретая поверхность частиц углей, имеющая тепловой спектр. Возможный вклад тепловой составляющей при T = 3100 K отмечен на рис. 5 штриховой линией. Более вероятным представляется то предположение. что тепловая составляющая в спектрах обусловлена вылетающим раскаленными частицами угля или частицами смолы, как это считается в работе [24]. Действительно, если расположить прозрачную стеклянную пластину на расстоянии 2 мм от поверхности образца угля, то при плотности энергии $H = H_{cr}^{(2)}$ на ней образуется черный налет, связанный с осаждением углеродных частиц, вылетающих с его поверхности. Таким образом, при значениях плотности энергии $H = H_{cr}^{(2)}$ во всех исследованных образцах углях происходит нагрев поверхности частиц до температуры, достаточной для инициирования термохимических реакций, что приводит к выходу и воспламенению летучих веществ по гетерогенному механизму зажигания.

На рис. 6 представлены спектры свечения образцов углей в ряду метаморфизма в момент воздействия лазерного импульса с плотностью энергии $H = H_{cr}^{(3)}$. Над образцами углей наблюдается пламя высотой $h \sim 3-4$ см.

Из вида спектров можно сделать вывод о том, что при $H = H_{cr}^{(3)}$ в образцах протекают процессы, аналогичные рассмотренным выше при плотностях энергии $H = H_{cr}^{(2)}$. Разделение спектральных



Рис. 5. Спектры свечения образцов углей в ряду метаморфизма при воздействии лазерных импульсов с плотностью энергии $H = H_{cr}^{(2)}$. Штриховые линии соответствует тепловой составляющей при T = 3100 К.

вкладов составляющих, описанных выше, попрежнему невозможно. Поскольку рис. 2, 5 и 6 выполнены в одинаковом масштабе в относительных единицах, то следует отметить, что спектральная яркость свечения исследованных марок углей возрастает с ростом плотности лазерной энергии. Таким образом, при увеличении плотности энергии $H \ge H_{cr}^{(2)}$ механизм зажигания поверхности образцов во время воздействия лазерных импульсов не изменяется, но происходит рост спектральной яркости свечения, что свидетельствует об увеличении скорости химических реакций с ростом температуры нагрева частиц угля. С помощью фотоэлектронного умножителя проведено измерение интенсивности свечения частиц углей (интегрального по спектру) в момент времени, соответствующий лазерному импульсу ($H = 9 \text{ Дж/см}^2$). Результат представлен на рис. 7.

Интенсивность свечения образцов углей возрастает практически линейно с увеличением степени их углефикации. Поскольку содержание летучих веществ уменьшается с увеличением степени углефикации, можно сделать вывод, что в интегральное по спектру свечение наибольший вклад дают не низкомолекулярные летучие веще-

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА том 41 № 3 2022



Рис. 6. Спектры свечения образцов углей в ряду метаморфизма при воздействии лазерных импульсов с плотностью энергии $H = H_{cr}^{(3)}$. Штриховые линии соответствуют тепловой составляющей при T = 3100 K.



Рис. 7. Зависимость интенсивности интегрального свечения частиц углей различных марок от степени их углефикации $(H = 9 \text{ Дж/см}^2)$.

ства, а вылетающие микрочастицы раскаленного угля или макромолекулы смолы, образующиеся в результате термического воздействия на частицы угля [25, 26].

выводы

1. Порог обнаружения свечения $H_{cr}^{(1)}$ исследованных частиц углей связан не с тепловым свечением нагретой поверхности, а с нагревом и зажиганием реакционно-активных микровыступов на их поверхности. Структура импульса свечения образцов углей повторяет пичковую структуру лазерных импульсов.

2. При плотности энергии $H = H_{cr}^{(2)}$ во время воздействия лазерного импульса происходит нагрев поверхности частиц до температуры, достаточной для инициирования химических реакций в их объеме, что приводит к выходу и зажиганию летучих веществ. Механизм зажигания гетерогенный.

3. При плотности энергии $H = H_{cr}^{(3)}$ во время воздействия лазерного импульса протекают те же процессы, что и при $H = H_{cr}^{(2)}$, но с большей интенсивностью свечения.

4. В спектры на всех стадиях зажигания в спектральном диапазоне 350-750 нм дают вклады свечения CO_2^* (пламя CO), возбужденных молекул H_2^* и H_2O^* и раскаленные частицы угля (либо смолы), что характерно для всех исследованных марок углей.

5. Интегральная по спектру интенсивность свечения увеличивается в ряду метаморфизма, что позволяет предположить, что наибольший вклад в спектры свечения дают не низкомолекулярные летучие вещества, а вылетающие микро-частицы раскаленного угля или макромолекулы смолы.

Авторы выражают благодарность к. х. н. Н.И. Федоровой за помощь в работе и подготовке образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Merzhanov A.G., Averson A.E. // Combust. and Flame. 1971. V. 16. № 1. P. 89; https://doi.org/10.1016/S0010-2180(71)80015-9
- 2. Phuoc T.X., Mathur M.P., Ekmann J.M. // Ibid. 1993. V. 94. № 4. P. 349;
- https://doi.org/10.1016/0010-2180(93)90119-N
- 3. 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
- Кузнецов Н.М., Козлов С.Н. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 5. С. 29; https://doi.org/10.1134/S0207401X19050078
- Коротких А.Г., Сорокин И.В., Селихова Е.А. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 7. С. 32; https://doi.org/10.31857/S0207401X20070080

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА том 41 № 3 2022

- 6. *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
- 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
- 8. *Chen J.C., Taniguchi M., Narato K., Ito K. //* Combust. and Flame. 1994. V. 97. № 1. P. 107; https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)90119-8
- 9. Yang Q., Peng Z. // Intern. J. Hydrogen Energy. 2010. V. 35. P. 4715; https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.045
- 10. *Zhang D.-K.* // Combust. and Flame. 1992. V. 90. № 2. P. 134; https://doi.org/10.1016/0010-2180(92)90115-6
- 11. Qu M., Ishigaki M., Tokuda M. // Fuel. 1996. V. 75. № 10. P. 1155;
- https://doi.org/10.1016/0016-2361(96)00079-8
 12. Norman F., Berghmans J., Verplaetsen F. // Procedia Engin. 2012. V. 45. P. 399;
- https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.177 13. Norman F., Berghmans J., Verplaetsen F. // Chem. Eng.
- Trans. 2013. V. 31. P. 739; https://doi.org/10.3303/CET1331124
- 14. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Ковалев Р.Ю. и др. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 2. С. 277; https://doi.org/10.21883/OS.2018.08.46373.29-18
- Адуев Б.П., Крафт Я.В., Нурмухаметов Д.Р., Исмагилов З.Р. // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. Т. 27. № 6. С. 549; https://doi.org/10.15372/KhUR2019172
- 16. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Крафт Я.В., Исмаеилов З.Р. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 3. С. 442; https://doi.org/10.21883/OS.2020.03.49073.302-19
- 17. Адуев Б.П., Крафт Я.В., Нурмухаметов Д.Р., Исмагилов З.Р. // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28. № 6. С. 535; https://doi.org/10.15372/KhUR2020260
- Адуев Б.П., Крафт Я.В., Нурмухаметов Д.Р., Исмагилов З.Р. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 12. С. 1898; https://doi.org/10.21883/OS.2020.12.50327.187-20
- Левшин Л.В. Люминесценция и ее измерения. М.: МГУ, 1989.
- Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
- Pogodaev V.A. // Combust., Expl. Shock Waves. 1984.
 V. 20. № 1. P. 46; https://doi.org/10.1007/BF00749917
- 22. Гейдон А. Спектроскопия и теория горения. М.: Изд-во иностр. лит., 1950.
- 23. *Пирс Р.* Отождествление молекулярных спектров. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.
- Li L., Tahmasebi A., Dou J. et al. // J. Energy Inst. 2020.
 V. 93. № 5. P. 2124; https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.05.007
- Niksa S., Kerstein A.R. // Combust. and Flame. 1986.
 V. 66. № 2. P. 95; https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90082-9
- Niksa S., Kerstein A.R. // Energy & Fuels. 1991. V. 5. № 5. P. 647; https://doi.org/10.1021/ef00029a006