

05 Спектральные характеристики свечения пламен каменных углей во время воздействия лазерных импульсов

© Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов, Я.В. Крафт, З.Р. Исмагилов

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения РАН,
650000 Кемерово, Россия

e-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.05.2022 г.

В окончательной редакции 30.05.2022 г.

Принята к публикации 10.06.2022 г.

Представлены результаты измерений характеристик свечения пламен каменных углей в начальные моменты зажигания при воздействии лазерных импульсов неодимового лазера (1064 nm, 120 μs). В микрочастицах углей марок ДГ, Г, Ж и К при превышении соответствующих критических плотностей энергии во время лазерного импульса происходит воспламенение поверхности и распространение пламени со скоростью $V \approx 50$ m/s. В спектры свечения пламен дают вклады излучение вылетающих раскаленных угольных частиц, возбужденных молекул H_2^* и H_2O^* , а также излучение пламени, возникающее при окислении углерода (CO^*) и окиси углерода (CO_2^*) кислородом воздуха.

Ключевые слова: уголь, лазер, зажигание, пламя, летучие вещества, степень углефикации, коксовый остаток.

DOI: 10.21883/OS.2022.08.52905.3750-22

Введение

В настоящее время основное направление использование угля — энергетическое. Возрастающие экологические проблемы требуют перехода к новым технологиям сжигания угля с пониженным выбросом загрязняющих веществ в окружающую среду.

Разработка новых технологий розжига и интенсификации горения угля невозможна без детального исследования начальных механизмов его воспламенения. При исследовании механизмов воспламенения углей в качестве источника зажигания может использоваться лазерное излучение [1–5], а для регистрации быстропротекающих процессов возможно применение электронно-оптических методов [1–3,5] и метода спектроскопии с высоким временным разрешением [6–8]. Приведем некоторые результаты подобных работ.

В [2] получены кинетические характеристики процесса лазерного зажигания частиц угля и углеродного материала импульсами неодимового лазера (1064 nm, 120 μs). Для угля с высоким содержанием летучих веществ длительность свечения, регистрируемого фотоэлектронным умножителем, достигала 40–70 ms, для антрацита — 15–30 ms, для углеродного материала — 50–80 ms. Для всех образцов наблюдали первый короткий пик на кинетической зависимости свечения, длительность которого для угля с высоким содержанием летучих веществ и углеродного материала достигала ~ 1 ms, для антрацита — 3 ms. Для антрацита и углеродного материала наблюдали второй компонент свечения, значительно превышающий по длительности первый пик. Для угля с высоким содержанием летучих веществ помимо первого

и второго компонентов зарегистрирован третий, еще более длительный компонент свечения.

Авторами [9] предложен механизм распространения пламени в пылеугольном аэрозоле при воздействии лазерного излучения, который заключался в следующем. Первоначально при воздействии лазерного излучения зажигается небольшое число частиц угля, из которых при термическом разложении выделяются летучие вещества. По мере распространения фронта горения близлежащие частицы угля нагреваются, претерпевают термическое разложение, осуществляется выход летучих веществ и их последующее зажигание.

В [10] разработана модель зажигания угля лазерным импульсом. Основные положения модели следующие. В результате воздействия лазерного импульса поверхность частицы угля нагревается и претерпевает термическое разложение, осуществляется выход летучих веществ, которые, смешиваясь с окислителем, поглощают часть лазерного излучения, что приводит к нагреву газовой фазы и развитию химических реакций в ней. Зажигание частиц угля может происходить по двум механизмам: 1 — первоначально зажигается газовая фаза, 2 — первоначально зажигается твердая поверхность частиц угля, затем зажигается газовая фаза.

В [1] экспериментально подтверждено наличие двух механизмов лазерного зажигания образцов углей, как и предполагалось в [10]. В работе [5] отмечается, что механизм зажигания угля определяется его положением в генетическом ряду.

В наших предыдущих работах проведены исследования лазерного зажигания бурого и ряда каменных углей Кузнецкого угольного бассейна при воздействии излу-

чения неодимового лазера с длительностью импульса $120 \mu\text{s}$ [11–14], исследованы спектрально-кинетические закономерности зажигания бурого угля [15].

В [11–15] выделено три стадии лазерного зажигания углей с соответствующими порогами, имеющие характерные времена горения на каждой стадии. Сделан вывод, что на первой стадии при достижении пороговой плотности энергии $H_{\text{cr}}^{(1)}$ наблюдается тепловое свечение поверхности образца угля, нагретой до температуры $T = 3100 \text{ K}$. На второй стадии при достижении пороговой плотности энергии $H_{\text{cr}}^{(2)}$ в миллисекундном временном интервале происходит зажигание углей, и наблюдается свечение пламени, отнесенное в [15] к излучению летучих веществ и тепловому свечению при $T \sim 2300 \text{ K}$. На третьей стадии зажигания при достижении пороговой плотности энергии $H_{\text{cr}}^{(3)}$ во временном интервале $\sim 100 \text{ ns}$ наблюдается тепловое свечение пламени с температурой $T \sim 1800 \text{ K}$, отнесенное в [15] к горению нелетучего остатка частиц угля.

Настоящая работа является продолжением проведенных ранее исследований и развивает представление о процессах, протекающих на начальных стадиях зажигания угольных частиц.

Образцы и методика эксперимента

Использовались угли Кузнецкого угольного бассейна (РФ) различных стадий метаморфизма: длиннопламенный газовый (ДГ), газовый (Г), жирный (Ж) и коксовый (К), взятые из той же партии образцов, использованных в работе [13]. После помола на шаровой мельнице и просеивания через сита отбирались фракции углей с широким распределением по размерам $d \leq 63 \mu\text{m}$. Результаты технического анализа углей приведены в [13]. Использовались образцы насыпной плотностью $\rho = 0.5 \text{ g/cm}^3$, массой 10 mg , которые помещались в медный патрон диаметром 5 mm и глубиной 2 mm . Функциональная схема экспериментальной установки и описание методики измерения спектров свечения твердых тел и пламен приведено в работе [15].

Для зажигания углей использован импульсный YAG:Nd³⁺-лазер, работающий в режиме свободной генерации на основной частоте ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) с длительностью импульса $\tau_i = 120 \mu\text{s}$ и энергией в импульсе $E \leq 1.5 \text{ J}$. Для регистрации свечения пламен использованы полихроматор и фотохронограф на базе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), работающий в режиме линейной развертки (стрик-камера). Участок свечения пламени, ограниченный размерами пространственно-временной щели $0.1 \times 0.2 \text{ mm}$, с помощью системы линз проецировался на вход полихроматора и преобразовывался в спектр в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 350\text{--}750 \text{ nm}$. Изображение спектра проецировалось на фотокатод ЭОП, который производил развертку спектра во времени. Световая матрица на выходном экране ЭОП считывалась ПЗС-матрицей и

Таблица 1. Пороги зажигания углей на различных стадиях зажигания [13]

Марка угля	$H_{\text{cr}}^{(2)}$, J/cm ²	$H_{\text{cr}}^{(3)}$, J/cm ²
ДГ	1.6	2.4
Г	1.85	3.3
Ж	1.1	5.5
К	0.9	6.5

передавалась в компьютер для последующей обработки. По вертикальным строкам световой матрицы можно построить спектр свечения в конкретный момент времени. По горизонтальным — зависимость интенсивности свечения от времени на фиксированной длине волны. Спектральное и временное разрешение определялись размерами спектрально-временной щели и составляли соответственно 10 nm и 2 ns на самой короткой развертке фотохронографа. На применяемой в настоящей работе развертке временное разрешение составляло $2 \mu\text{s}$, что много меньше длительности импульса лазера.

Для коррекции спектров свечения на спектральную чувствительность измерительного тракта применялся метод эталонной лампы [16].

Поверхность образца располагалась перпендикулярно к лазерному излучению и параллельно оптической оси измерительного тракта. Образец мог перемещаться по вертикали так, чтобы в пространственно-временную щель могли попадать различные участки пламени.

Экспериментальные результаты

Исследование спектров пламен проводилось с использованием пороговых плотностей энергии излучения, на которых появляется пламя, связанное с летучими веществами ($H_{\text{cr}}^{(2)}$) и зажиганием нелетучего остатка частиц углей ($H_{\text{cr}}^{(3)}$), измеренных для использованных углей в работе [13] и приведенных в табл. 1.

Как показал эксперимент, спектрально-кинетические закономерности свечения для исследованных углей имеют одинаковый качественный характер при воздействии соответствующих H_{cr} , указанных в таблице. В связи с ограниченным объемом статьи ниже приводим иллюстративный материал на примере угля марки ДГ.

На рис. 1 представлена кинетическая зависимость свечения на длине волны $\lambda = 560 \text{ nm}$ (рис. 1, *a*) и спектр свечения в максимуме интенсивности кинетической зависимости свечения на расстоянии 1 mm от образца (рис. 1, *b*) при воздействии с плотностью энергии $H_{\text{cr}}^{(2)}$. Фронт свечения соответствует длительности лазерного импульса, начало свечения запаздывает на $\sim 20 \mu\text{s}$ относительно лазерного импульса. Спад свечения заканчивается через $\sim 200 \mu\text{s}$.

На рис. 2 представлены те же зависимости при воздействии лазерного импульса с плотностью энергии $H_{\text{cr}}^{(3)}$.

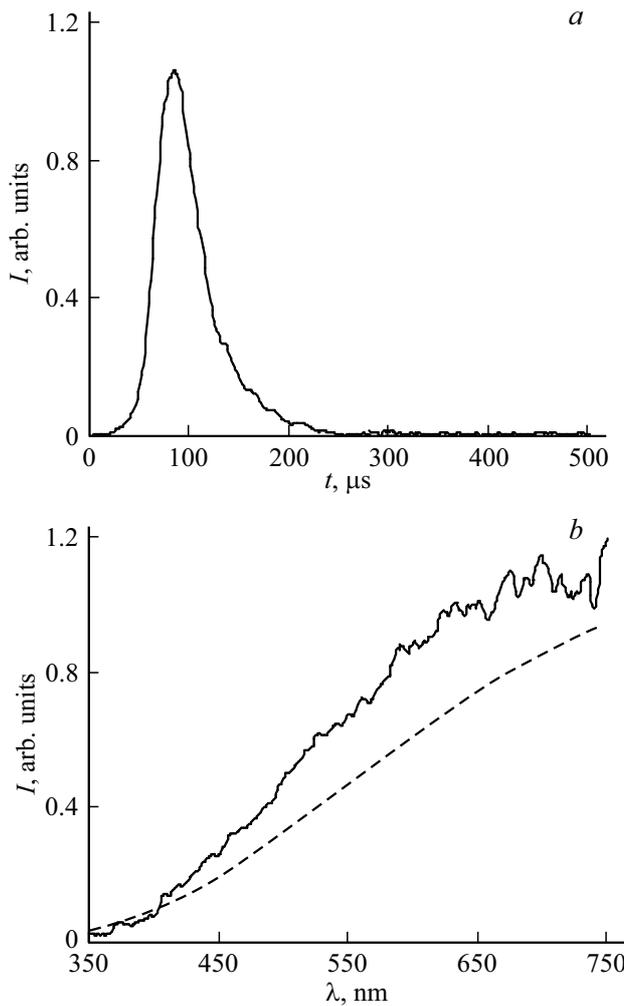


Рис. 1. Кинетическая зависимость интенсивности свечения и спектр свечения пламени над образцом на расстоянии 1 mm от поверхности образца угля при $H_{cr}^{(2)} = 1.6 \text{ J/cm}^2$. (a) Зависимость интенсивности свечения от времени; (b) спектр в максимуме кинетической зависимости свечения, штриховая линия — аппроксимация свечения углеродных частиц формулой Планка с температурой 3100 К.

Кинетика и спектр свечения имеют аналогичный характер с закономерностями свечения, полученными при воздействии с плотностью энергии $H_{cr}^{(2)}$, но интенсивность свечения возрастает в ~ 5 раз.

На рис. 3 представлены кинетическая зависимость свечения пламени на длине волны $\lambda = 560 \text{ nm}$ и спектры свечения в максимумах интенсивности кинетической зависимости свечения на расстоянии 2 mm от поверхности образца при воздействии с плотностью энергии $H_{cr}^{(2)}$. Начало свечения запаздывает на $\sim 40 \mu\text{s}$ относительно начала лазерного импульса. Кинетическая зависимость свечения имеет неэлементарный характер, длительность свечения составляет величину $\sim 2 \text{ ms}$ (рис. 3, a). На первый взгляд, различие длительностей свечения на рис. 1, a и 3, a вызывает недоумение, однако представление этих рисунков в одинаковом масштабе позволяет

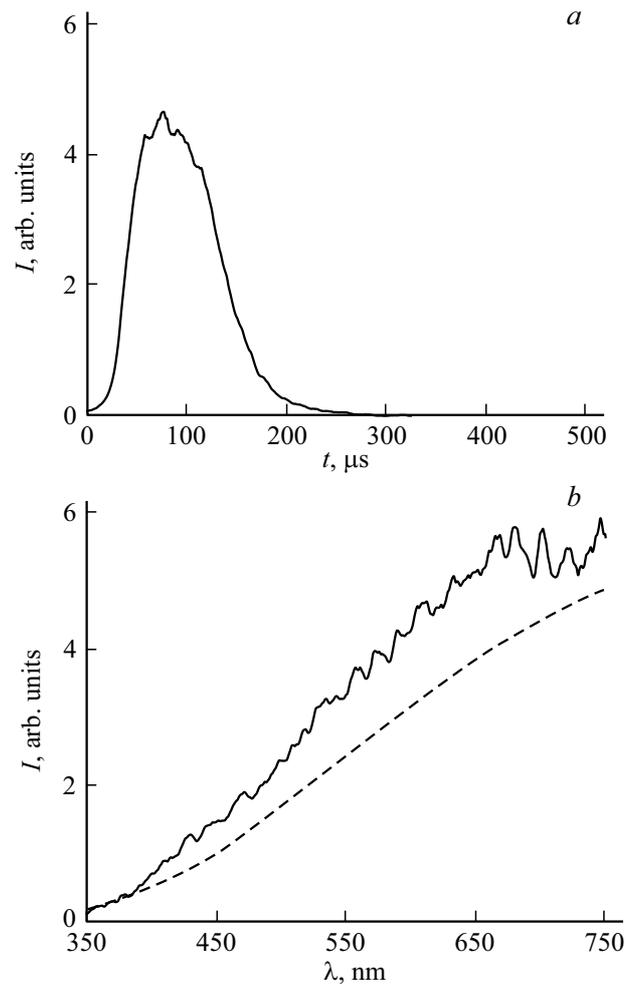


Рис. 2. Кинетическая зависимость интенсивности свечения и спектр свечения пламени над образцом на расстоянии 1 mm от поверхности образца угля при $H_{cr}^{(3)} = 2.4 \text{ J/cm}^2$. (a) Зависимость интенсивности свечения от времени; (b) спектр в максимуме кинетической зависимости свечения. Штриховая линия — аппроксимация свечения углеродных частиц формулой Планка с температурой 3100 К.

сделать вывод, что длинные компоненты свечения с максимумами 2 и 3 на рис. 3, a не видны на рис. 1, a в силу ограниченности динамического диапазона градаций яркости ЭОП. На расстоянии 1 mm интенсивность свечения в максимуме рис. 1, a превышает интенсивность свечения в максимумах рис. 2, a в 50–100 раз, поэтому интенсивность свечения, представленного на рис. 3, a, имеет уровень шумов на рис. 1, a.

На рис. 4 представлены кинетическая зависимость свечения и спектры свечения на расстоянии 2 mm от поверхности образцов при плотности энергии излучения $H_{cr}^{(3)}$. Фронт свечения пламени соответствует длительности импульса излучения. Свечение заканчивается через $\sim 400 \mu\text{s}$. В некоторых случаях во временном интервале $\geq 1 \text{ ms}$ регистрируется свечение небольшой интенсивности (рис. 4, a).

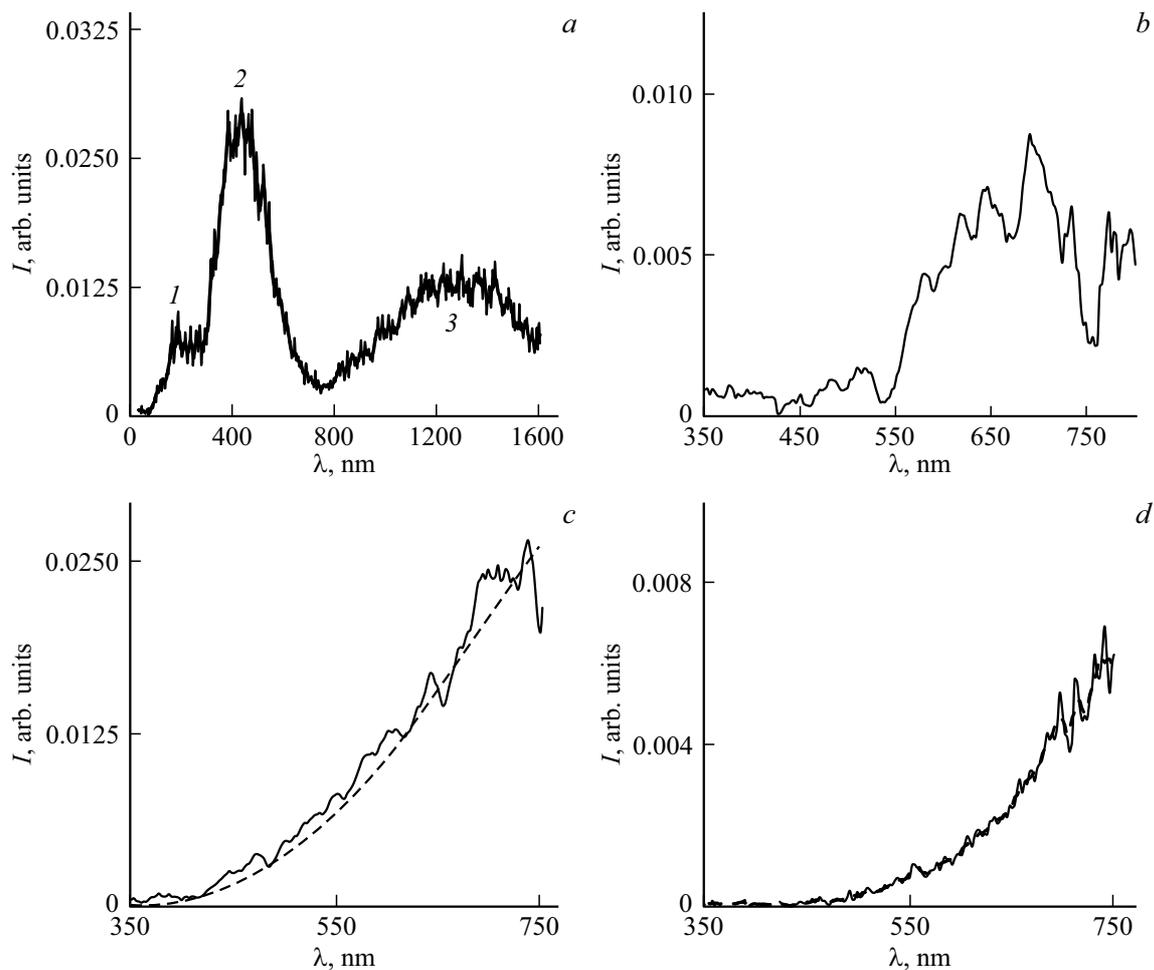


Рис. 3. Кинетическая зависимость интенсивности свечения и спектры свечения пламени над образцом на расстоянии 2 мм от поверхности образца угля при $H_{\text{cr}}^{(2)} = 1.6 \text{ J/cm}^2$ в различные моменты времени. (а) Зависимость интенсивности свечения от времени; (б) спектр свечения в момент времени 1 на рис. 3, а; (с) спектр свечения в момент времени 2 на рис. 3, а; (д) спектр свечения в момент времени 3 на рис. 3, а. Штриховая линия — аппроксимация свечения углеродных частиц формулой Планка с температурой 3100 К.

При воздействии на образцы излучением с плотностью энергии, большей $H_{\text{cr}}^{(2)}$, но меньшей $H_{\text{cr}}^{(1)}$, на сплошные спектры накладываются три линии свечения ($\lambda = 555, 590, 625 \text{ nm}$) во временном интервале 300–600 μs после воздействия лазерного импульса. Этот результат продемонстрирован на рис. 5.

Спектры свечения интерпретированы в следующем разделе.

Обсуждение результатов

Начало свечения пламени на рис. 1, а и 2, а синхронизовано с началом воздействия лазерного импульса на образцы. Запаздывание начала свечения на рис. 1, а и 2, а соответствует времени распространения светящихся продуктов на расстояние 1 и 2 мм от поверхности частиц угля и составляет соответственно ~ 20 и 40 μs . Отсюда можно сделать оценку скорости рас-

пространения пламени на данном этапе: $V \approx 50 \text{ m/s}$. Из этих результатов следует также важный вывод, что свечение, представленное на рис. 1, б и 2, б, связано с пламенем, возникающим на поверхности угольных частиц непосредственно во время воздействия лазерного импульса, с последующим распространением. Таким образом, при плотностях энергии $H > H_{\text{cr}}^{(2)}$ происходит воспламенение поверхности частиц непосредственно во время лазерного воздействия.

На расстоянии 1 мм от образца спектры свечения имеют неэлементарный характер (рис. 1, б и 2, б), в частности не являются в полной степени тепловыми. Вид спектров позволяет предположить, что в свечение дают вклад возбужденные молекулы летучих веществ и вылетающие раскаленные угольные частицы, свечение которых имеет тепловой характер. Наличие последних можно обнаружить по черному налету на прозрачной стеклянной пластине, если расположить ее на расстоянии 1–2 мм от образца. Если предположить, что

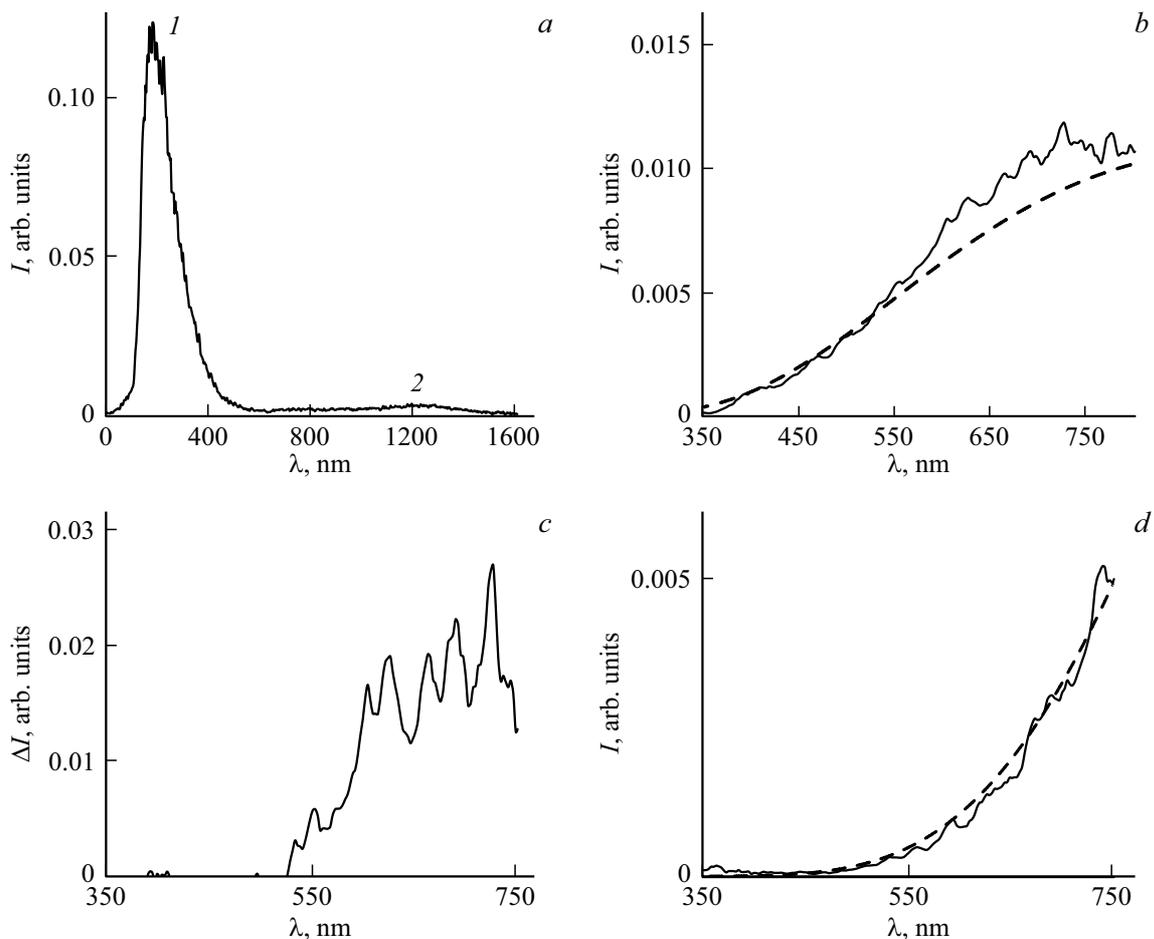
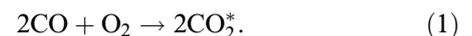


Рис. 4. Кинетическая зависимость интенсивности свечения и спектры свечения пламени над образцом на расстоянии 2 мм от поверхности образца угля при $H_{cr}^{(3)} = 2.4 \text{ J/cm}^2$ в различные моменты времени. (a) Зависимость интенсивности свечения от времени; (b) спектр свечения в момент времени 1 на рис. 4, a; (c) разностный спектр сплошной и штриховой кривых на рис. 4, b; (d) спектр свечения в момент времени 1.2 ms. Штриховая линия — аппроксимация свечения углеродных частиц формулой Планка с температурой 3100 К.

температура вылетающих угольных частиц составляет $T = 3100 \text{ К}$ (штриховая линия на рис. 1, b и 2, b), то разность спектров 1 и 2 на рис. 1, b и 2, b дает спектр летучих веществ, который представлен на рис. 6. Допущение для температуры угольных частиц $T = 3100 \text{ К}$ в некоторой степени произвольно. Однако оно опирается на измеренную температуру поверхности при $H \leq H_{cr}$ для бурого угля [15]. Отметим, что такое представление имеет в значительной мере качественный характер, поскольку масштабные коэффициенты для свечения угольных частиц на рис. 1, b и 2, b взяты произвольно. Тем не менее, с нашей точки зрения, из разностных спектров рис. 6 можно сделать вывод о качественном составе воспламеняющихся летучих компонентов. Вид разностных спектров (рис. 6) позволяет предположить, что, как и в спектрах пламени бурого угля [15], в свечение дают вклады пламя СО (300–550 nm) [17,18] и возбужденных молекул H_2^* и H_2O^* (550–750 nm) [17,18].

На расстоянии 2 мм первый максимум на кинетической зависимости свечения (рис. 3, a) связан с продукта-

ми, вылетающими с поверхности в момент воздействия лазерного импульса. При этом свечение наблюдается только в спектральном диапазоне 550–750 nm (рис. 3, b). Это свечение мы связали со свечением возбужденных молекул H_2O^* и H_2^* , как и в [15]. Свечение пламени СО в коротковолновой части спектра отсутствует в отличие от свечения на рис. 1, b, 2, b, 6. Пламя СО связано с протеканием реакции



По-видимому, сразу после образования молекул СО на поверхности угольных частиц происходит их окисление кислородом воздуха по реакции (1) уже на первом миллиметре от поверхности угольных частиц. Поэтому свечение пламени СО на расстоянии 2 мм от поверхности угольных частиц уже не наблюдается. Спектры в последующие моменты времени в максимумах кинетических зависимостей 2 и 3 рис. 3 (рис. 3, c, 3, d) описываются формулой Планка при температурах

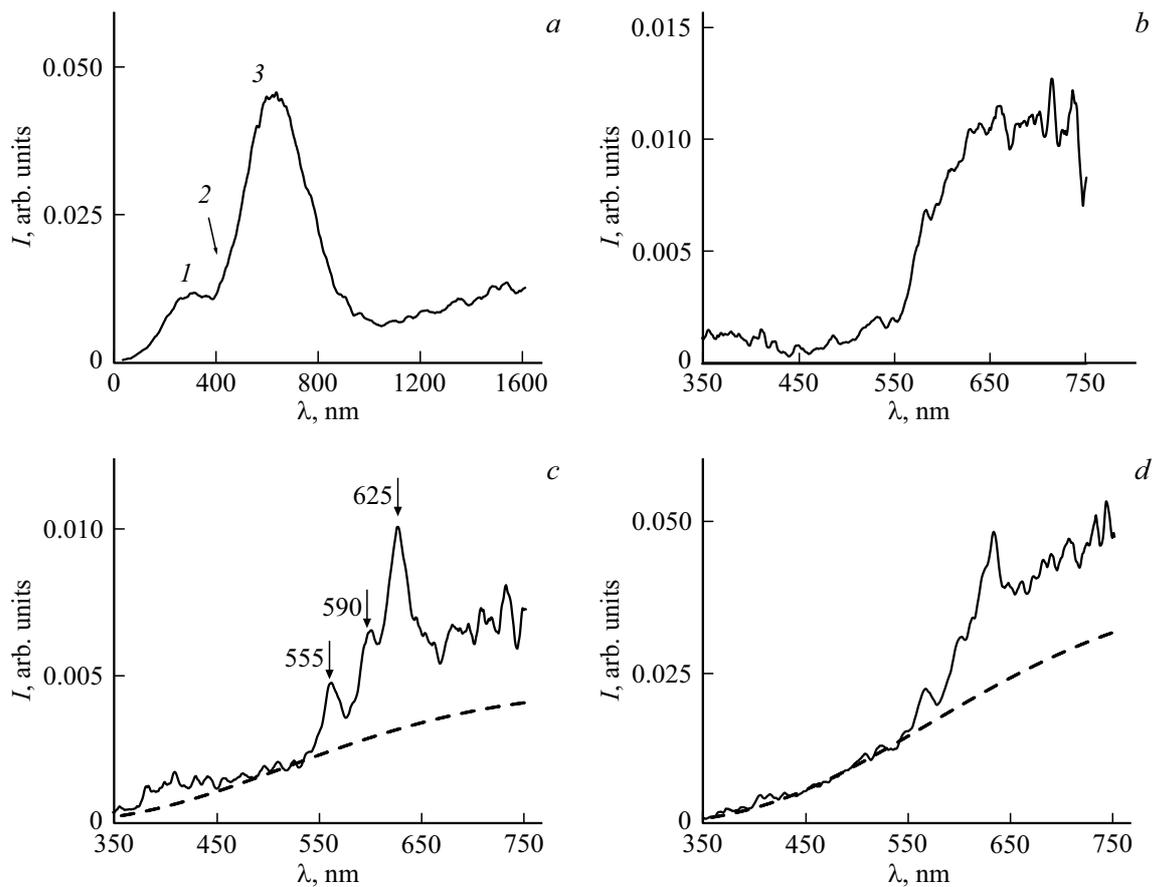


Рис. 5. Спектрально-кинетические характеристики свечения пламени угля марки ДГ на расстоянии 2 mm от поверхности при воздействии на образец излучением с плотностью энергии $H_{cr}^2 = 2 \text{ J/cm}^2$. (a) Кинетика свечения, (b) спектр свечения в момент времени 1, (c) спектр свечения в момент времени 2, (d) спектр свечения в момент времени 3. Штриховая линия — аппроксимация свечения углеродных частиц формулой Планка с температурой 3100 К.

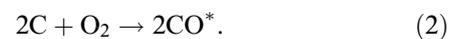
$T = 2400 \text{ K}$ и $T = 1800 \text{ K}$ соответственно, т. е. являются тепловыми.

Отсюда следует, что в результате экзотермических реакций в частицах угля происходит инициирование горения со сложной кинетикой в миллисекундном временном интервале, приводящее к вылету раскаленных угольных частиц.

Спектры свечения пламени на расстоянии 2 mm при воздействии с критической плотностью энергии $H_{cr}^{(3)}$ (рис. 4) во время воздействия лазерного излучения отличаются от спектров свечения на расстоянии 1 mm при $H_{cr}^{(3)}$ (рис. 2) тем, что в коротковолновой части спектра отсутствует свечение пламени CO (рис. 4, b и 4, c). Вклад в спектр свечения дают раскаленные частицы сажи при $T = 3100 \text{ K}$ и свечение возбужденных молекул H_2^* и H_2O^* (рис. 4, b, 4, c). По временным характеристикам (рис. 4, a) это пламя возникает во время воздействия лазерного импульса, т. е. в результате зажигания поверхности.

В миллисекундном временном интервале (рис. 4, d) наблюдается вылет раскаленных угольных частиц при $T = 1800 \text{ K}$.

При плотности энергии излучения большей $H_{cr}^{(2)}$, но меньшей $H_{cr}^{(3)}$ на сплошной спектр накладываются линии 555, 590, 625 nm. Согласно справочным данным [17,18], линию 625 nm можно связать со свечением возбужденных молекул CO^* . Можно предположить, что наблюдается окисление углеродных частиц кислородом воздуха по реакции



Линии свечения с максимумами 555 и 590 nm, согласно справочным данным [17,18], можно связать со свечением возбужденных молекул C_2^* .

При увеличении плотности энергии излучения (рис. 4) свечение CO^* и C_2^* не наблюдается. Это может быть связано с увеличением интенсивности свечения сплошного спектра. Если при этом не происходит пропорционального увеличения выхода молекул CO и C_2 , то их свечение трудно различить на фоне сплошного спектра.

Качественно аналогичные результаты получены с использованием углей марок Г, Ж, К.

Имеется некоторое различие в температурах свечения в максимумах 2 и 3 на расстоянии 2 mm от поверхности

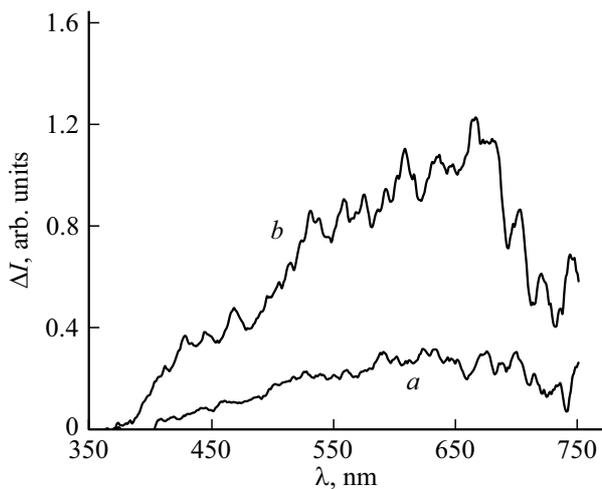


Рис. 6. Разностные спектры между кривыми 1 и 2: *a* — на рис. 1, *b*, *b* — на рис. 2, *b*.

Таблица 2. Интенсивность первого пика свечения пламени различных марок углей при соответствующих пороговых плотностях энергии на расстоянии 1 mm от поверхности образца угля ($\lambda = 560$ nm)

Марка угля	<i>I</i> , rel. units	
	$H_{cr}^{(2)}$	$H_{cr}^{(3)}$
ДГ	1.0	4.2
Г	2.4	7.5
Ж	2.5	8.0
К	4.0	9.0

образца для углей марок Г и Ж, для угля марки К на расстоянии 2 mm от образца наблюдается два максимума свечения, а не три, как для других марок каменных углей. Кроме того, не наблюдается линейчатый спектр для угля марки К.

Основной результат состоит в том, что при превышении характерной для каждой марки угля критической плотности энергии $H_{cr}^{(2)}$ уже во время лазерного импульса происходит воспламенение поверхности угольных частиц. В спектры свечения пламени, возникающего на поверхности частиц угля, дают вклады свечение вылетающих угольных частиц и выделяющихся летучих веществ, среди которых можно идентифицировать возбужденные молекулы H_2^* и H_2O^* , а также окись углерода CO, которая воспламеняется, вступая в реакцию с кислородом воздуха с образованием CO_2^* [17].

Количественное различие между марками углей наблюдается в интенсивностях свечения сразу после воздействия лазерного импульса, которое демонстрируют результаты измерений в табл. 2. С увеличением степени углефикации наблюдается рост интенсивности свечения. Примечательно, что $H_{cr}^{(2)}$ в этом ряду углей уменьшается (табл. 1). На данном этапе можно предполагать, что

при достижении соответствующих порогов зажигания скорости химических реакций, приводящих к воспламенению поверхности частиц угля, возрастают с увеличением степени углефикации, что приводит к увеличению интенсивности свечения пламен. Также отметим, что для конкретной марки угля интенсивность свечения возрастает с ростом плотности энергии излучения H , о чем свидетельствуют данные рис. 1, 2 и табл. 2. Это свидетельствует о возрастании скорости химических реакций, в результате которых возрастает интенсивность свечения с увеличением H .

В результате поглощения энергии лазерных импульсов происходит зажигание нелетучего остатка при превышении $H_{cr}^{(3)}$ во временном интервале 10–100 ms, как это показано в работе [13]. Однако исследование механизма зажигания нелетучего остатка не входило в задачи настоящей работы.

Анализируя результаты спектрально-кинетических измерений свечения пламен, можно сделать вывод, что уже во время лазерного импульса процессы воспламенения поверхности угольных частиц и газообразных продуктов пиролиза происходят параллельно.

Выводы

1. При воздействии импульсов YAG:Nd³⁺-лазера ($\tau = 120 \mu s$) на угли марок ДГ, Г, Ж, К при превышении соответствующих критических плотностей энергий зажигания ($H_{cr}^{(2)}$) во время лазерного импульса происходит воспламенение поверхности угольных частиц и распространение пламени со скоростью $V \approx 50$ m/s.

2. Спектры свечения имеют неэлементарный характер. Вклад в свечение дают присутствующие в пламени раскаленные угольные частицы, летучие вещества: возбужденные молекулы H_2^* , H_2O^* , а также возбужденные молекулы CO^* и CO_2^* , возникающие при окислении молекул углерода кислородом воздуха.

3. Интенсивность свечения пламен возрастает с ростом углефикации при соответствующих плотностях энергии зажигания $H_{cr}^{(2)}$ и $H_{cr}^{(3)}$.

4. Для конкретной марки угля интенсивность свечения возрастает с ростом плотности энергии лазерного излучения.

5. В условиях эксперимента настоящей работы процессы воспламенения поверхности угольных частиц и газообразных продуктов пиролиза, возникающих во время воздействия лазерного импульса, происходят параллельно.

Благодарности

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

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T.X. Phuoc, M.P. Mathur, J.M. Ekmann. *Comb. Flame*, **93** (1–2), 19 (1993). DOI: 10.1016/0010-2180(93)90081-D
- [2] J.C. Chen, M. Taniguchi, K. Narato, K. Ito. *Comb. Flame*, **97** (1), 107 (1994). DOI: 10.1016/0010-2180(94)90119-8
- [3] M. Taniguchi, H. Kobayashi, S. Auhata. *Symposium (International) on Combustion*, **26** (2), 3189 (1996). DOI: 10.1016/S0082-0784(96)80164-0
- [4] M. Taniguchi, H. Okazaki, H. Kobayashi, S. Azuhata, H. Miyadera, H. Muto, T. Tsumura. *J. Energy Resour. Technol.*, **123** (1), 32 (2001). DOI: 10.1115/1.1347989
- [5] D. Zhang. *Comb. Flame*, **90** (2), 134 (1992). DOI: 10.1016/0010-2180(92)90115-6
- [6] Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов, Р.Ю. Ковалев, Я.В. Крафт, А.А. Звсков, А.В. Каленский. *Известия вузов. Физика*, **59** (9–2), 136 (2016).
- [7] Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов, Г.М. Белокуров, Н.В. Нелюбина, А.В. Гудилин. *Опт. и спектр.*, **122** (3), 522 (2017). DOI: 10.7868/S0030403417020027 [B.P. Aduev, D.R. Nurmukhametov, G.M. Belokurov, N.V. Nelyubina, A.V. Gudilin. *Opt. Spectrosc.*, **122** (3), 504 (2017)].
- [8] Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов, Г.М. Белокуров, Н.В. Нелюбина, А.В. Каленский, Н.Л. Алукер. *Хим. физика*, **36** (6), 45 (2017). DOI: 10.7868/S0207401X17060024 [B.P. Aduev, D.R. Nurmukhametov, G.M. Belokurov, N.V. Nelyubina, A.V. Kalenskii, N.L. Aluker. *Russian J. Phys. Chem. B*, **11** (3), 460 (2017)].
- [9] M. Taniguchi, H. Kobayashi, K. Kiyama, Y. Shimogori. *Fuel*, **88** (8), 1478 (2009). DOI: 10.1016/j.fuel.2009.02.009
- [10] T.X. Phuoc, M.P. Mathur, J.M. Ekmann. *Comb. Flame*, **94** (4), 349 (1993). DOI: 10.1016/0010-2180(93)90119-N
- [11] Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов, Н.В. Нелюбина, Р.Ю. Ковалев, А.Н. Заостровский, З.Р. Исмагилов. *Хим. физика*, **35** (12), 47 (2016). DOI: 10.7868/S0207401X16120025 [B.P. Aduev, D.R. Nurmukhametov, N.V. Nelyubina, R.Y. Kovalev, Z.R. Ismagilov. *Russian J. Phys. Chem. B*, **10** (6), 963 (2016)].
- [12] Б.П. Адуев, Я.В. Крафт, Д.Р. Нурмухаметов, З.Р. Исмагилов. *Химия в интересах устойчивого развития*, **27** (6), 549 (2019). DOI: 10.15372/ChUR2019172
- [13] Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов, Я.В. Крафт, З.Р. Исмагилов. *Опт. и спектр.*, **128** (12), 1898 (2020). DOI: 10.21883/OS.2020.12.50327.187-20 [B.P. Aduev, D.R. Nurmukhametov, Ya.V. Kraft, Z.R. Ismagilov. *Opt. Spectrosc.*, **128** (12), 2008 (2020)].
- [14] Y.V. Kraft, D.R. Nurmukhametov, B.P. Aduev, Z.R. Ismagilov. *Eurasian Chemical-Technological J.*, **22** (1), 3 (2020). DOI: 10.18321/ectj924
- [15] Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов, Р.Ю. Ковалев, Я.В. Крафт, А.Н. Заостровский, А.В. Гудилин, З.Р. Исмагилов. *Опт. и спектр.*, **125** (2), 277 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.08.46373.29-18 [B.P. Aduev, D.R. Nurmukhametov, R.Y. Kovalev, Ya.V. Kraft, Z.R. Ismagilov. *Opt. Spectrosc.*, **125** (2), 293 (2018)].
- [16] Л.В. Левшин, А.М. Салецкий. *Люминесценция и ее измерения* (МГУ, М., 1989). [L.V. Levshin, A.M. Saletskii. *Luminescence and Its Measurements* (Mosk. Gos. Univ., Moscow, 1989)].
- [17] Р. Пирс, А. Гейдон. *Отождествление молекулярных спектров* (Из-во ИЛ, М., 1949). [R. Pearse, A. Gaydon. *The Identification of Molecular Spectra* (Springer, Netherlands, 1976)].
- [18] А. Гейдон. *Спектроскопия и теория горения* (Изд-во ИЛ, М., 1950). [A. Gaydon. *Spectroscopy and Combustion Theory* (Springer, New York, 1942)].