

СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ И ПЛАЗМЫ БУРОГО УГЛЯ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ

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

УДК 621.373.8:622.33

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
Институт углехимии и химического материаловедения, Кемерово, Россия;
e-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

(Поступила 4 мая 2022, в окончательной редакции — 2 февраля 2023)

Исследованы спектрально-кинетические характеристики свечения бурого угля при воздействии на образцы импульсами лазера (1064 нм, 14 нс, 1 ГВт/см²) в среде воздуха при атмосферном давлении и в вакууме при давлении 10⁻² Торр. Показано, что во время воздействия лазерных импульсов над образцами в вакууме наблюдается пароплазменный факел, выделены линии свечения ионизированного углерода и атомов водорода. При атмосферном давлении в спектрах преобладает свечение пламени CO. После лазерного воздействия в спектрах выделяются вращательно-колебательное свечение H₂O и тепловое свечение углеродных частиц. В среде воздуха при атмосферном давлении во временном интервале 0.2—1.0 мс при воздействии лазерных импульсов $W = 1 \text{ ГВт/см}^2$ происходит зажигание нелетучего остатка частиц угля с вылетом раскаленных частиц углерода с температурой ~2500 K.

Ключевые слова: свечение пламени, бурый уголь, лазерное излучение.

The spectral-kinetic characteristics of the brown coal glow when exposed to samples by laser pulses (1064 nm, 14 ns, 1 GW/cm²) in the air at atmospheric pressure and in the vacuum at pressure of 10⁻² Torr have been studied. It has been shown that during the action of laser pulses, a vapor plasma torch is observed over the samples in vacuum, and the glow lines of ionized carbon and hydrogen atoms are evolved. At atmospheric pressure CO flame glow dominates in the spectra. After laser exposure, rotational-vibrational glow of H₂O and thermal glow of carbon particles are distinguished in the spectra. In the air at atmospheric pressure in time interval of 0.2–1.0 ms, when exposed to laser pulses of $W = 1 \text{ GW/cm}^2$, a nonvolatile residue of coal particles is inflamed with the departure of incandescent carbon particles with temperature of about 2500 K.

Keywords: flame glow, brown coal, laser radiation.

Введение. Розжиг пылеугольного топлива в промышленных печах осуществляется с помощью газовых или мазутных горелок. В настоящее время ведутся исследования физических методов розжига пылеугольного топлива без использования мазута [1, 2]. В связи с этим перспективно использование лазерного излучения для зажигания пылеугольного топлива. Для технологических разработок необходимо фундаментальное исследование механизма лазерного зажигания углей. Наибольшее применение находят неодимовые и CO₂-лазеры, работающие как в непрерывном, так и в импульсном режиме [3—6]. В последнем случае, как правило, применяют лазеры, работающие в режиме свободной генерации с длительностью импульсов в 10⁻²—10⁻³ с [3, 4].

Ранее [7—12] было изучено зажигание углей импульсами неодимового лазера с длительностью $\tau_i \approx 120 \text{ мкс}$, что позволило получить новую информацию о механизме лазерного зажигания в интервале 10⁻⁴—10⁻³ с. Представляет интерес исследование воздействия излучения лазера, работающего

SPECTRAL-KINETIC CHARACTERISTICS OF BROWN COAL FLAME AND PLASMA GLOW AFTER EXPOSURE TO HIGH-POWER DENSITY LASER RADIATION

B. P. Aduev*, D. R. Nurmukhametov, V. D. Volkov, Ya. V. Kraft, Z. R. Ismagilov (Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Coal Chemistry and Chemical Materials Science, Kemerovo, Russia; e-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru)

в режиме модулированной добротности с длительностью импульса $\tau_i \sim 10^{-8}$ с. В сочетании с методами оптической регистрации с временным разрешением $\sim 10^{-8}$ с можно получить новую информацию о механизме лазерного зажигания углей.

Известно [13], что при плотности мощности $W \sim 10^9$ Вт/см² возможно протекание процессов испарения вещества с последующим пробоем в газе, размножение электронной лавины и образование лазерной плазмы. В настоящее время лазеры в режиме модуляции добротности с интенсивностью $W \sim 10^9$ Вт/см² применяют в методе лазерной спектроскопии пробоя (LIBS) в среде инертных газов для анализа элементного состава исследуемых материалов [14—16].

Для исследования механизма зажигания углей лазерными импульсами высокой мощности представляет интерес экспериментальное изучение зажигания углей в среде воздуха, а также образования плазмы в вакууме. Предметом изучения данной работы является установление вкладов и временных интервалов образования угольной плазмы в среде вакуума и процесса зажигания угля в среде воздуха.

Образцы и методика эксперимента. Применялся бурый уголь Тисульского месторождения Канско-Ачинского буроугольного бассейна [7—12]. Для получения экспериментальных образцов проводились помол угля на шаровой мельнице АГО-2 и мокрое просеивание через сито с ячейкой 63 мкм. Просеянный порошок собирался в специальной посуде, закрытой для доступа воздуха. Результаты технического анализа показали содержание влаги в образцах $W_a = 11.1\%$, зольность $A_d = 9.5\%$, выход летучих веществ $V_{daf} = 51/4\%$ и содержание углерода $C_{daf} = 61.4\%$. Измерение распределения частиц порошка угля по размерам с помощью лазерного дифрактометра Fritsch Analytics-22 показало, что размеры частиц углей находятся в диапазоне 0.5—63 мкм. Наибольшее количество частиц имеют размер 10—40 мкм, максимум распределения находится при 20 мкм.

Использованы прессованные образцы в виде таблеток с плотностью $\rho = 1$ г/см³, диаметром 5 мм и толщиной 2 мм. Эксперименты проведены на установке, схема которой представлена на рис. 1. Зажигание углей осуществлялось с помощью единичных импульсов излучения первой гармоники ($\lambda = 1064$ нм) Nd:YAG-лазера, работающего в режиме модуляции добротности с длительностью импульса $\tau_i = 14$ нс и энергией в импульсе 0.72 Дж. Излучение лазера 1 ослаблялось нейтральными светофильтрами 2. Для контроля энергии часть излучения (8 %) отводилась прозрачной стеклянной пластины 3 на калиброванный фотодиод 4. С помощью поворотного зеркала 5 и фокусирующей линзы 6 с фокусным расстоянием $F = 25$ см излучение направлялось на образец, находящийся на массивном основании в экспериментальной камере 7. Конструкция держателя образца 7 позволяла регулировать расстояние от поверхности образца до оптической оси измерительного тракта путем перемещения в направлении, указанном стрелкой. В экспериментальной камере с помощью форвакуумного насоса создавалось остаточное давление 10^{-2} Торр. Диаметр лазерного пятна на образце $d = 2.5$ мм. Таким образом, на образец выводилось излучение с плотностью энергии 13.5 Дж/см² и плотностью мощности 1 ГВт/см². Энергия лазерного излучения определялась с помощью пироэлектрического измерителя энергии PE50BF-C (Ophir[®] Photonics).

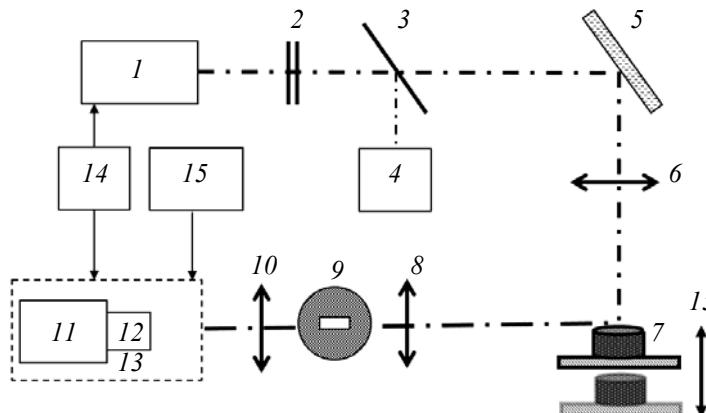


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — импульсный Nd:YAG-лазер, 2 — нейтральные светофильтры, 3 — светоделительная пластина, 4 — калиброванный фотодиод, 5 — поворотное зеркало, 6 — линза ($F = 25$ см), 7 — экспериментальная сборка с образцом, 8, 10 — линзы ($F = 10$ см), 9 — спектрально-временная щель (поворнута на 90°), 11 — стрик-камера (фотохронограф), 12 — полихроматор, 13 — спектрофотохронограф "Взгляд-2А", 14 — блок синхронизации, 15 — компьютер

Для регистрации свечения пламен использованы полихроматор 12 и фотохронограф 11 на базе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), работающий в режиме линейной развертки, которые в едином комплексе представляют собой спектрофотохронограф 13. Изображение участков пламени с помощью линзы 8 строилось в плоскости спектрально-временной щели 9 (на рис. 1 для наглядности щель развернута на 90°). Отверстие в щели размером 0.2 × 0.1 мм определяло спектральное и временное разрешения регистрирующей системы. Изображение спектрально-временной щели с помощью линзы 10 в масштабе 1:1 передавалось на вход полихроматора 12. Таким образом, пространственное разрешение в области объекта соответствовало размеру щели. Полихроматор раскладывал свечение на составляющие в диапазоне 350—750 нм. Далее полоса спектра с помощью фотохронографа 11 разворачивалась во времени. Световая матрица с выходного экрана ЭОП считывалась ПЗС-матрицей. Сигнал ПЗС-матрицы передавался на запоминающее устройство в компьютер 15 для последующей цифровой обработки. Спектральное разрешение 10 нм, временное разрешение определялось используемой разверткой стрик-камеры. В данной работе использовались развертки 2000, 250, 10 и 2 мкс/экран с временным разрешением 30, 3 мкс и 120, 20 нс соответственно. Запуск лазера и развертки стрик-камеры в соответствующие моменты времени осуществлялся с помощью импульсного генератора Г5-56 14.

Зарегистрированный сигнал представлял собой матрицу, вертикальные элементы которой позволяли построить спектр свечения образца в диапазоне 350—750 нм в определенный момент времени, горизонтальные элементы — кинетику свечения образца на выбранной длине волны в пределах указанного спектрального диапазона. Для коррекции спектров свечения на спектральную чувствительность измерительного тракта применялся метод эталонной лампы [17].

Результаты и их обсуждение. В первой серии экспериментов регистрировалось свечение, возникающее на расстоянии 1 мм от поверхности образца после воздействия лазерного импульса. Зависимость интенсивности свечения над поверхностью образца от времени (рис. 2, *а*) имеет два максимума. Первое интенсивное свечение наблюдается сразу после воздействия лазерного импульса. На применяемой развертке стрик-камеры временное разрешение составляло 3 мкс. Для более точного измерения кинетики свечения на начальном участке проводились измерения на развертке с временным разрешением 20 нс. Результат измерения на длине волны $\lambda = 620$ нм представлен на рис. 2, *б*, из которого следует, что свечение запаздывает относительно воздействия лазерного импульса на время $\tau_{z1} \sim 0.5$ мкс (начало координат на рис. 2, *а* привязано к моменту воздействия лазерного импульса). Ширина пика свечения на половине амплитуды $\Delta t \sim 300$ нс. Второй максимум свечения небольшой интенсивности наблюдается через $t_2 \sim 20$ мкс (рис. 2, *а*). Спектр свечения в момент времени $t_2 = 20$ мкс

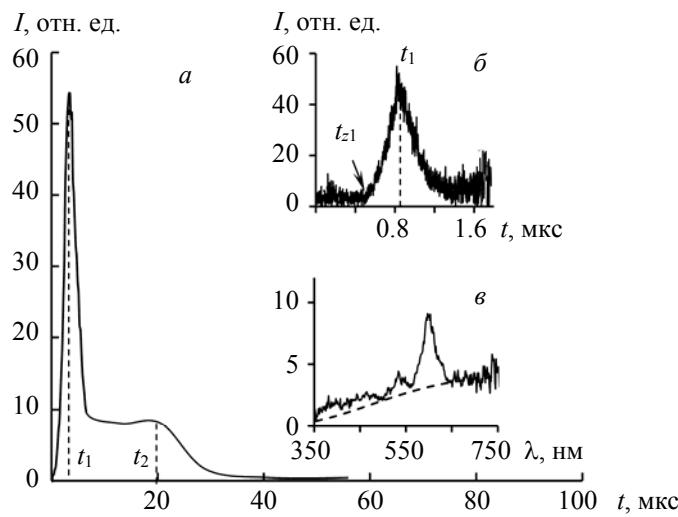


Рис. 2. Кинетика свечения пламени (в среде воздуха) на расстоянии 1 мм от поверхности образца; плотность мощности лазерного излучения 1 ГВт/см²; $\lambda = 620$ нм; развертка 250 мкс (*а*) кинетика свечения при эксперименте с разверткой 2 мкс (*б*) и спектр свечения в момент времени $t_2 = 20$ мкс (*в*)

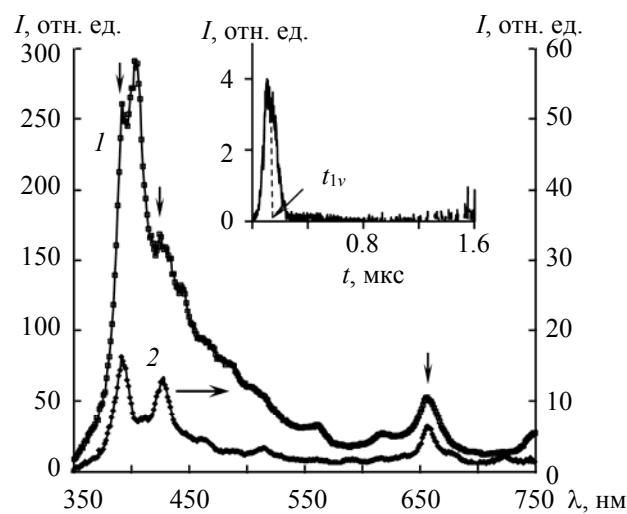


Рис. 3. Спектр свечения пламени в среде воздуха (1) и плазмы в вакууме (2) на расстоянии 1 мм в момент времени $t_1 \sim 1$ мкс на рис. 2; плотность мощности лазерного излучения 1 ГВт/см^2 ; развертка 250 мкс; на вставке — кинетика свечения на 656 нм в вакууме при эксперименте с разверткой 2 мкс

представлен на рис. 2, в. Для того чтобы разделить вклады свечения плазменного факела и пламени, возникающего при зажигании угля в результате химической реакции в окислительной атмосфере, необходимо измерить спектрально-кинетические характеристики свечения в начальные моменты времени после воздействия лазерного импульса.

На рис. 3 представлен спектр свечения в момент времени $t_1 \sim 1$ мкс на кинетической кривой рис. 2, измеренный в среде воздуха при атмосферном давлении (спектр 1). Для исключения окисления углерода на воздухе и образования пламени проведено измерение спектра свечения в вакууме при давлении $P = 10^{-2}$ Торр в момент времени $t_{1v} \sim 150$ нс (спектр 2). На вставке рис. 3 представлена кинетическая кривая свечения на длине волны 656 нм, измеренная на развертке с временным разрешением 20 нс. Запаздывание относительно начала координат в пределах временного разрешения составляет $t_{z2} \sim 20$ нс. Ширина пика свечения на половине амплитуды $\Delta t \approx 100$ нс.

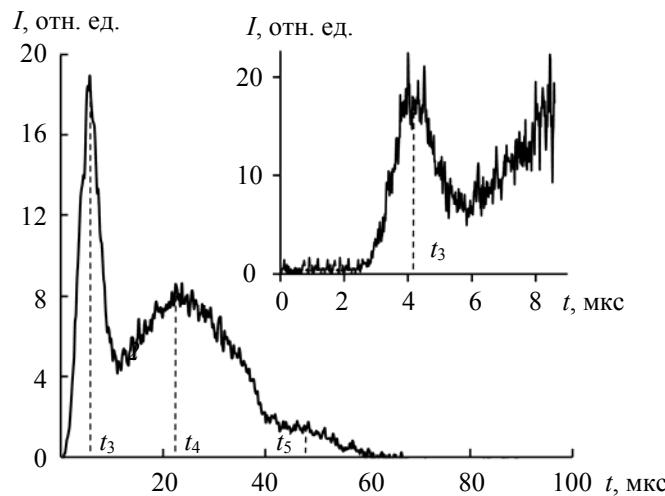


Рис. 4. Кинетика свечения пламени в среде воздуха на расстоянии 3 мм от поверхности образца; плотность мощности лазерного излучения 1 ГВт/см^2 ; $\lambda = 620$ нм; развертка 250 мкс; на вставке — кинетика свечения при эксперименте с разверткой 10 мкс

В следующей серии экспериментов проведены спектрально-кинетические измерения характеристик свечения на расстоянии 3 мм от поверхности образца. Зависимость интенсивности свечения от времени на $\lambda = 620$ нм представлена на рис. 4. Наблюдаются два максимума: через $t_3 \sim 4$ мкс после воздействия лазерного импульса и через $t_4 \sim 25$ мкс. Для более точного определения запаздывания максимума свечения в момент времени t_3 измерена зависимость интенсивности свечения от времени на развертке стрик-камеры в интервале 0—10 мкс (вставка). Видно, что свечение запаздывает относительно воздействия лазерного импульса на образец на $t_{z3} \approx 2.5$ мкс. Длительность первого пика свечения на половине амплитуды ~ 2 мкс.

Проведены спектрально-кинетические измерения свечения на расстоянии 3 мм от поверхности образца в среде воздуха при атмосферном давлении и в вакууме при $P = 10^{-2}$ Торр. Спектр, измеренный в среде воздуха при атмосферном давлении в момент времени, соответствующий первому максимуму рис. 4, и спектр, измеренный в вакууме, представлены на рис. 5. На рис. 6 представлены спектры свечения в момент времени $t_4 \sim 25$ мкс, соответствующий второму максимуму рис. 4, и через $t_5 \sim 50$ мкс.

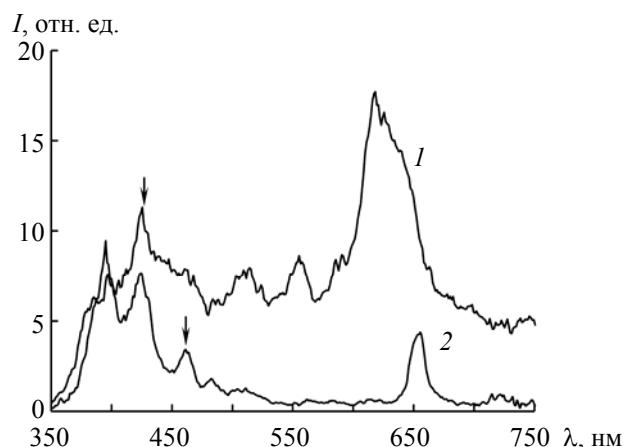


Рис. 5. Спектр свечения пламени в среде воздуха (1) и плазмы в вакууме (2) на расстоянии 3 мм в момент времени t_3 на рис. 4; плотность мощности лазерного излучения 1 ГВт/см^2 ; развертка 250 мкс

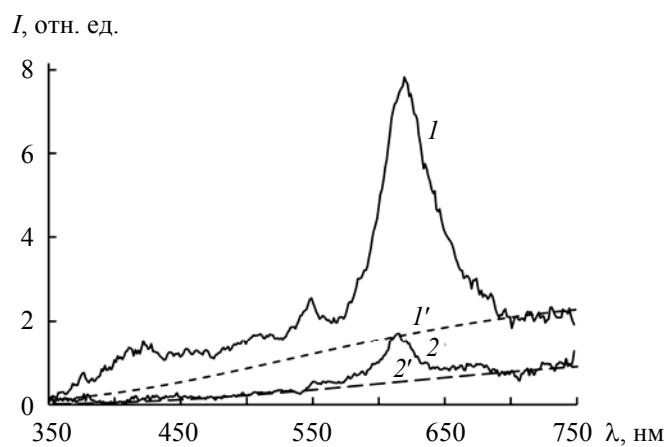


Рис. 6. Спектры свечения пламени в среде воздуха на расстоянии 3 мм в моменты времени t_4 (1) и t_5 (2) на рис. 4; плотность мощности 1 ГВт/см^2 ; развертка 250 мкс; $1', 2'$ — их аппроксимация формулой Планка при $T = 3200$ и 2800 К соответственно

Проведены спектрально-кинетические измерения свечения на расстоянии 3 мм от поверхности образца при плотности мощности 1 ГВт/см^2 во временному интервале 0—1000 мкс. Ранее в этом временному интервале наблюдали зажигание образцов бурого угля при плотности энергии $H = 4 \text{ Дж/см}^2$

($W = 0.3 \text{ ГВт/см}^2$) [18]. Результаты измерений представлены на рис. 7. В среде воздуха кроме первого пика свечения наблюдается свечение во временном интервале $t = 200—1000 \text{ мкс}$. Спектр свечения образца через 500 мкс после воздействия лазерного импульса представлен на вставке рис. 7. Спектр описывается формулой Планка при $T = 2500 \text{ К}$. Измерения в вакууме при $P = 10^{-2} \text{ Торр}$ показали отсутствие свечения в интервале $\Delta t = 200—1000 \text{ мкс}$. Спектры свечения в первом максимуме кинетической кривой на воздухе и в вакууме рассмотрены выше (рис. 5).

Логично предположить, что во время воздействия лазерного импульса при плотности мощности $\sim 1 \text{ ГВт/см}^2$ в среде воздуха образуются как лазерная плазма, так и пламя в результате зажигания образцов в окислительной среде. Рассмотрим спектрально-кинетические закономерности свечения, измеренные на расстоянии 1 мм от поверхности образца (рис. 2 и 3). Спектр 1 на рис. 3 представляет собой суммарный спектр плазмы и пламени. Спектр 2, измеренный в вакууме, связан только с плазменным факелом. В спектре плазмы можно выделить линии свечения ионизированного углерода C II ($\lambda = 393.6$ и 426.3 нм) [19], а также свечение атомарного водорода ($\lambda = 656.3 \text{ нм}$). Интенсивность свечения плазмы значительно ниже, чем суммарное свечение. Таким образом, наблюдаемое свечение (спектр 1) связано с пламенем. Тем не менее некоторый вклад указанных линий можно заметить и на спектре 1 (помечено стрелками).

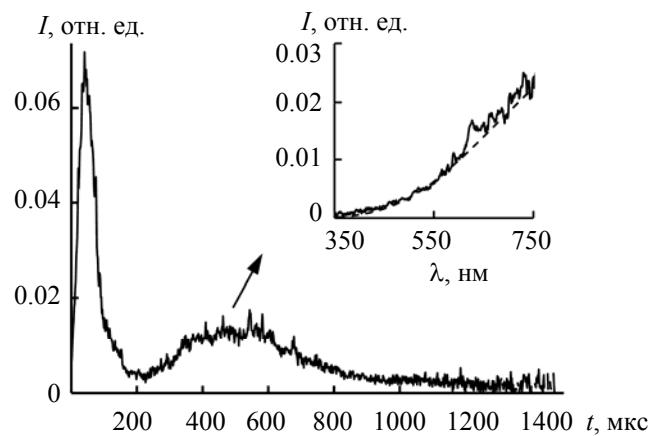


Рис. 7. Кинетика свечения пламени (в среде воздуха) на расстоянии 3 мм от поверхности образца; плотность мощности 1 ГВт/см^2 ; $\lambda = 620 \text{ нм}$; развертка 2000 мкс ; на вставке — спектр свечения в момент времени 500 мкс ; штриховая линия — аппроксимация формулой Планка при $T = 2500 \text{ К}$

Результаты, представленные на рис. 2 б, позволяют оценить скорость распространения плазмы и пламени на расстоянии $L_1 = 1 \text{ мм}$ от поверхности образца:

$$V_1 = L_1/t_{z1} \approx 2 \cdot 10^3. \quad (1)$$

Отметим, что интенсивности спектров 1 и 2 нельзя сравнивать однозначно. Из результатов, представленных на вставке рис. 3 следует, что в вакууме плазма распространяется со значительно большей скоростью. Вероятно, в среде воздуха при атмосферном давлении происходит рассеяние атомов и ионов плазмы на молекулах воздуха и скорость распространения плазмы снижается до значения V_1 . Компонентов, опережающих свечение, на рис. 2, б не обнаружено. Предполагаем, что в воздухе при $P = 1 \text{ атм}$ спектр плазмы имеет аналогичный состав, но меньшую интенсивность свечения, чем спектр 2 на рис. 3. Таким образом, спектр 1 на рис. 3 представляет собой в основном свечение пламени с небольшим вкладом линий свечения плазмы. По характеру спектра можно предположить, что сплошной спектр в диапазоне 350—550 нм связан со свечением пламени CO [20, 21]. В красной области наблюдается свечение атомарного водорода как в спектре плазмы, так и в спектре пламени.

Спектр небольшой интенсивности через $t_2 \sim 20 \text{ мкс}$ (рис. 2, в) после воздействия лазерного импульса можно объяснить следующим образом. В УФ-области свечение небольшой интенсивности связано с почти исчезающим пламенем CO. Линии $\lambda = 535$ и 586 нм , согласно [20, 21], связаны со свечением возбужденных молекул CO*. Кроме того, можно выделить составляющую, которая описывается формулой Планка при температуре 3600 К (штриховая линия). Вклад такой составляющей в свечение пламени углей наблюдали ранее при воздействии импульсов с $\tau_i = 120 \text{ мкс}$ и $W \sim 10^4 \text{ Вт/см}^2$ [10].

Эту составляющую спектра пламени связываем с вылетающими раскаленными частицами углерода при зажигании нелетучего остатка частиц угля [10].

Рассмотрим спектрально-кинетические характеристики свечения, измеренные на расстоянии 3 мм от поверхности образца. С использованием результатов, представленных на вставке рис. 4, можно оценить среднюю скорость распространения пламени на расстоянии $L_2 = 3$ мм от поверхности образца:

$$V_2 = L_2/t_{z2} \approx 1 \cdot 10^3. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что распространение пламени в диапазоне 0—3 мм происходит с уменьшающейся скоростью по мере удаления от поверхности образца.

Кинетическая кривая свечения, как и в предыдущем случае, содержит два максимума (рис. 4). Рисунки построены в одинаковом масштабе, поэтому следует отметить существенную количественную разницу интенсивностей свечения на расстояниях 1 и 3 мм от поверхности образцов.

Сравнение рис. 3 и 5 показывает, что в УФ-области, например на $\lambda = 390$ нм, интенсивность свечения на расстоянии 3 мм от поверхности образца уменьшается в ~60 раз относительно интенсивности свечения на 1 мм. Для свечения плазмы аналогичное уменьшение интенсивности в вакууме ~5 раз. В спектре плазмы (рис. 5) наблюдаются линии С II (393.6 нм, 426 нм), C₂* (465 нм), H* (565.6 нм). В связи с более резким уменьшением интенсивности свечения пламени CO вклад плазмы в суммарный спектр на расстоянии 3 мм от поверхности образца более заметен (рис. 5, спектр 1), чем на расстоянии 1 мм от поверхности образца (рис. 3, спектр 1).

В красной области интенсивность линии водорода в вакууме на расстоянии 3 мм от поверхности образца уменьшается в ~15 раз относительно расстояния 1 мм. В спектре 1 рис. 5 появляется широкая линия с $\lambda_m \approx 620$ нм. Сравнение рис. 3 и 5 показывает, что интенсивность на $\lambda_m \approx 620$ нм уменьшается в ~3 раза. Можно сделать вывод, что полоса с $\lambda_m \approx 620$ нм почти не заметна на расстоянии 1 мм, однако резко выделяется на фоне значительного уменьшения интенсивности полосы водорода ($\lambda = 656.3$ нм). Полосу при $\lambda_m \approx 610$ —620 нм наблюдали ранее в экспериментах с использованием $\tau_i = 120$ мкс и $W \sim 10^4$ Вт/см² [10] и идентифицировали как свечение близко расположенных полос вращательно-колебательного спектра молекулы H₂O [20, 21].

В спектрах на рис. 6 во втором максимуме кинетики на рис. 4, т. е. через $t_4 = 25$ мкс и в более поздний момент времени $t_5 = 50$ мкс, наблюдается общее уменьшение интенсивности свечения, причем свечение пламени пламени CO в УФ-области исчезает полностью через $t_5 \sim 50$ мкс (спектр 2). Как и на рис. 2, в, наблюдаются составляющие с планковским спектром, связанные с вылетающими раскаленными частицами углерода.

Свечение во временном интервале 200—1000 мкс (рис. 7) в среде воздуха при атмосферном давлении и отсутствие этого свечения в вакууме позволяют однозначно связать его с пламенем. В экспериментах с использованием импульсов $\tau_i = 120$ мкс и $W \sim 10^4$ Вт/см² аналогичное свечение наблюдалось при зажигании нелетучего остатка частиц углей [10].

Заключение. Воздействие гигантских лазерных импульсов ($\tau_i = 14$ нс и $W = 1$ ГВт/см²) на микрочастицы бурого угля в среде воздуха при атмосферном давлении приводит к образованию лазерной плазмы и зажиганию частиц угля. В результате воздействия лазерного импульса на образцы в среде воздуха при атмосферном давлении спектр на расстоянии 1 мм от поверхности образца связан со свечением пламени CO в диапазоне 350—550 нм, на которое накладываются линии плазмы ионизированного углерода С II (393.6 и 426.3 нм). В красной области наблюдается свечение атомарного водорода H*. В спектре на расстоянии 3 мм от поверхности образца в среде воздуха при атмосферном давлении наблюдается снижение интенсивности свечения пламени молекулы CO и возбужденных атомов водорода H*, поэтому становится более заметным вклад линий плазмы в УФ-области. В красной области преобладает вращательно-колебательный спектр H₂O*. В спектрах пламен через 20 и 50 мкс после воздействия лазерного импульса на образцы основной вклад дает свечение возбужденных молекул CO* и раскаленных углеродных частиц с планковским спектром. В среде воздуха при атмосферном давлении во временном интервале 0.2—1 мс при воздействии лазерных импульсов $W = 1$ ГВт/см² происходит зажигание нелетучего остатка частиц угля с вылетом раскаленных частиц углерода с температурой ~2500 К.

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

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

- [1] **A. S. Askarova, E. I. Karpenko, Y. I. Lavrishcheva, V. E. Messerle, A. B. Ustimenko.** IEEE Transact. Plasma Sci., **35** (2007) 1607—1616
- [2] **V. E. Masserle, E. I. Karpenko, A. B. Ustimenko, O. A. Lavrichshev.** Fuel Proc. Technol., **107** (2013) 93—98
- [3] **M. Taniguchi, H. Kobayashi, K. Kiyama, Y. Shimogori.** Fuel, **88** (2009) 1478—1484
- [4] **В. М. Бойко, П. Воланьский, В. Ф. Климкин.** Физика горения и взрыва, **17** (1981) 71—77
- [5] **А. В. Кузиковский, В. А. Погодаев.** Физика горения и взрыва, **13** (1977) 783—788
- [6] **T. X. Phuoc, M. R. Mathur, J. M. Ekmann.** Comb. Flame, **94** (1993) 349—362
- [7] **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** (2018) 277—283
- [8] **Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Н. В. Нелюбина, Р. Ю. Ковалев, А. Н. Заостровский, З. Р. Исмагилов.** Хим. физика, **35** (2016) 47—49
- [9] **Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Я. В. Крафт, З. Р. Исмагилов.** Журн. прикл. спектр., **87** (2020) 50—55 [B. P. Aduev, D. R. Nurmukhametov, Y. V. Kraft, Z. R. Ismagilov. J. Appl. Spectr., **87** (2020) 41—45]
- [10] **Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Я. В. Крафт, З. Р. Исмагилов.** Опт. и спектр., **128** (2020) 18—25
- [11] **Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Г. М. Белокуров, Я. В. Крафт, З. Р. Исмагилов.** Химия твердого топлива, **3** (2021) 65—70
- [12] **Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Я. В. Крафт, З. Р. Исмагилов.** Опт. и спектр., **128** (2020) 442—448
- [13] **Н. Б. Делоне.** Взаимодействие лазерного излучения с веществом, Москва, Наука (1989)
- [14] **K. Liu, C. He, C. Zhu, J. Chen, K. Zhan, X. Li.** TrAC Trends Anal. Chem., **143** (2021) 116357
- [15] **J. Cai, M. Dong, Y. Zhang, Y. Chen, Y. Liang, J. Lu.** Spectrochim. Acta B: At. Spectrosc., **180** (2021) 106195
- [16] **S. Yao, J. Zhao, Z. Wang, Y. Deguchi, Z. Lu, J. Lu.** Spectrochim. Acta B: At. Spectrosc., **149** (2018) 249—255
- [17] **Л. В. Левшин, А. М. Салецкий.** Люминесценция и ее измерения, Москва, МГУ (1989)
- [18] **Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Н. В. Нелюбина, Я. В. Крафт, З. Р. Исмагилов.** Журн. прикл. спектр., **88** (2021) 582—586 [B. P. Aduev, D. R. Nurmukhametov, N. V. Nelyubina, Ya. V. Kraft, Z. R. Ismagilov. J. Appl. Spectr., **88** (2021) 761—764]
- [19] **J. E. Sansonetti, W. C. Martin.** J. Phys. Chem. Ref. Data, **34** (2005) 1559—2259
- [20] **Р. Пирс, А. Гейдон.** Отождествление молекулярных спектров, Москва, Иностр. лит. (1949)
- [21] **А. Гейдон.** Спектроскопия и теория горения, Москва, Иностр. лит. (1950)