

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ С ТВЕРДОФАЗНЫМИ ПРОДУКТАМИ РЕАКЦИИ

© 2014 г. А. И. Кирдяшкин, В. Г. Саламатов, Ю. М. Максимов,
В. Ф. Тарасенко, Э. А. Соснин, Р. М. Габбасов

Представлено академиком Н.З. Ляховым 08.07.2013 г.

Поступило 05.08.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565214010149

Известно, что процессы горения в обширном ряде техногенных и природных систем сопровождаются эффектом электромагнитного излучения в оптической, ИК- и радиочастотной частях спектра [1, 2]. Эффект обусловлен явлениями теплового излучения и хемилюминесценции продуктов реакции. Химическая энергия, высвобождаемая при горении, обычно не превышает 1–2 эВ в среднем в расчете на атом продукта. Поэтому спектр теплового излучения ограничен видимым диапазоном длин волн. Углеводородные и водородные пламена характеризуются излучением, простирающимся в УФ-диапазон вплоть до $\lambda = 250$ нм (энергия квантов ≈ 5 эВ) [1]. Последнее свидетельствует о том, что при горении происходит неравновесная концентрация энергии на квантовых состояниях отдельных частиц системы.

Более высокую концентрацию энергии следует ожидать при горении гетерогенных систем, образующих конденсированные продукты реакции, так как в этом случае достигается экстремально высокая плотность энергии, выделяемая в единицу времени (по расчетам, до 10^6 – 10^8 Вт/см³). Это подтверждается эффектом неравновесной эмиссии электронов и положительных ионов с поверхности конденсированных фаз, который ранее наблюдали в процессах горения и теплового взрыва ряда порошковых систем. Газовая плазма, образующаяся над поверхностью конденсированных частиц, обладает высокой электронной температурой (до 80000 К в системе Ti–Si) [3] и заметной долей “горячих” электронов с энергией до 60–150 эВ (системы Ni–Al, Mo–V) [4]. В плазме присутствуют атомарные пары компонентов реакции первой и второй кратности ионизации (системы Ti–V, Zr–V) [5]. Относительно недавно обнаружены

признаки мягкого рентгеновского излучения при тепловом взрыве порошковой системы Ti–V [6].

Каков предельный уровень концентрации энергии, возможно ли рентгеновское излучение в процессе горения – эти вопросы на сегодняшний день остаются открытыми.

В настоящей работе изучено высокоэнергетическое излучение волны горения нанодисперсной системы Ti–V, где обеспечиваются условия высокоскоростного протекания гетерогенных реакций в конденсированных фазах.

Реакционная система представляла собой порошковую смесь состава Ti + 31.5 мас. % V, приготовленную путем смешивания аморфного черного бора (содержание бора 98 мас. %, размер частиц ≤ 1 мкм) и нанодисперсного титана (содержание титана 99.8 мас. %, размер частиц 80–100 нм) в спирте с последующим нанесением суспензии (толщина $h = 70$ мкм) на поверхность алюминиевой фольги ($h = 13$ мкм) методом шелкографии. Исследования проводили по схеме, представленной на рис. 1. Горение смеси инициировали тепловым импульсом от спирали, расположенной на поверхности образца. Рентгеновскую пленку Kodak RAR-2497 помещали внутри светонепроницаемого контейнера с окном для ввода высокоэнергетического излучения. Для защиты фотопленки от воздействия тепла, ИК- и оптического излучения волны горения окно перекрывали пакетом защитных экранов: титановая фольга ($h = 20$ мкм) и черная светонепроницаемая бумага ($h = 120$ мкм). Последние, как показали исследования, сохраняли свою целостность в процессе горения смеси. Для контроля за составом высокоэнергетического излучения на поверхность фоточувствительного слоя пленки помещали прокатанную никелевую сетку (толщина нити 20 мкм, ширина нити 140 мкм, размер ячейки 400×400 мкм). Динамический контроль за процессом горения осуществляли путем ско-

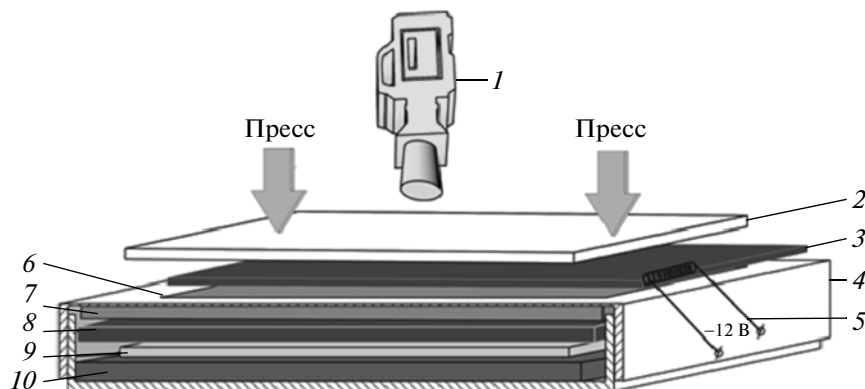


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

1 – скоростная видеокамера, 2 – оптическое стекло, 3 – образец реакционной смеси, 4 – контейнер, 5 – поджигающая спираль, 6 – окно для ввода излучения, 7 – титановая фольга, 8 – черная бумага, 9 – рентгеновская фотопленка, 10 – медная пластина.

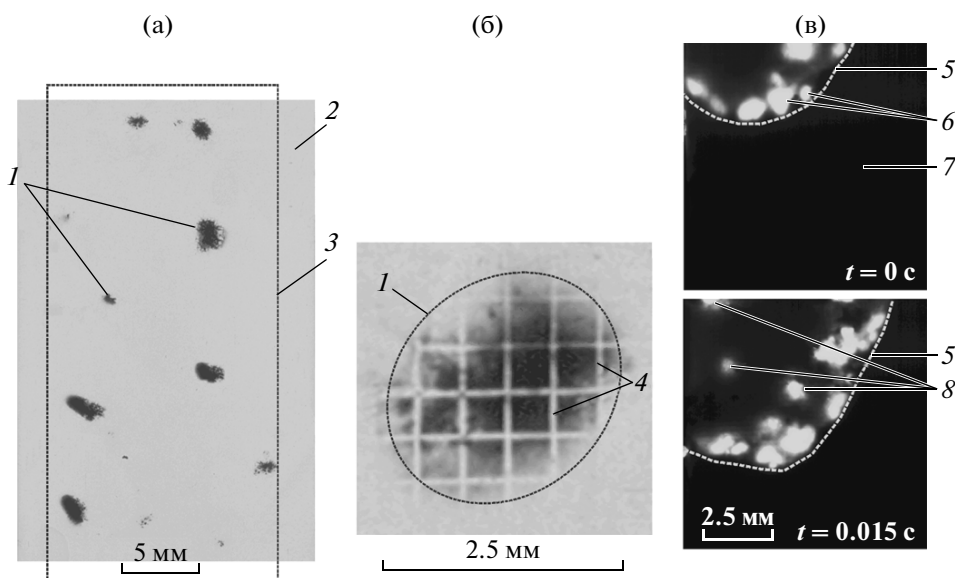


Рис. 2. Засветка рентгеновской фотопленки (а, б) в процессе распространения волны горения в порошковой системе Ti–В и кадры видеосъемки процесса (в).

1 – пятна засветки, 2 – рентгеновская пленка, 3 – место расположения образца реакционной смеси, 4 – отпечаток контура никелевой сетки, 5 – фронт горения, 6 – реакционный очаг, 7 – исходная смесь, 8 – продукты реакции.

ростной видеосъемки камерой Motion Pro X3 через смотровое стекло. Эксперименты вели в воздушной среде при нормальном давлении.

Исследования показали, что волна горения генерирует излучение рентгеновского диапазона, проникающее через защитные экраны и вызывающее засветку фотопленки в виде пятен размером до 5 мм (рис. 2а). Согласно данным видеосъемки, в процессе распространения реакции по образцу в волне горения стохастически возникают локальные реакционные очаги (рис. 2в). Последние, по-видимому, являются основными источниками излучения, что объясняет дискрет-

ность засветки фотопленки. При горении ощущается запах озона, который косвенно подтверждает эффект генерации рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение волны СВС формирует на фотопленке отпечаток контура никелевой сетки (рис. 2б). Фотометрический анализ [7] локальной яркости изображения (участки 80×200 мкм) вблизи границ сетки (в зоне тени, создаваемой нитью сетки, $-i_r$; за пределами тени $-i_o$) позволил оценить коэффициент прохождения излучения:

$$\beta_r = J_r/J_{r0} \approx (i_r - i_o)/(i_{r0} - i_o),$$

где $J_{го}$, J_r — соответственно величины интенсивности рентгеновского излучения до и после прохождения через слой никеля, i_0 — яркость изображения неэкспонированной фотопленки. Из анализа данных статистической обработки величин β_r по 100 измерениям и известных поглощающих свойств никеля [8] следует, что излучение волны горения содержит спектр рентгеновских фотонов от 4.5 до 30 кэВ, где $\approx 28\%$ потока обеспечивают фотоны с энергией более 18 кэВ.

Формирование рентгеновского излучения в условиях нашего эксперимента пока не имеет строгого объяснения. Можно предположить, что в ходе быстропротекающего физико-химического превращения реакционной системы на микроуровнях конденсированных веществ происходит экстремальная концентрация энергии, которая выделяется в процессе реакции, что приводит к возбуждению электронов до энергии порядка единиц и десятков килоэлектронвольт. “Горячие” электроны при взаимодействии с веществом реакционной системы или с защитными экранами генерируют рентгеновское излучение, наблюдаемое в эксперименте.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11–03–00688а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gaydon A.G.* The Spectroscopy of Flames. 2nd ed. N.Y.: Wiley, 1974. 167 с.
2. *Viskara R.* Radiative Transfer in Combustion Systems: Fundamentals and Applications. West Lafayette: Heat Transfer Laboratory; School of Mech. Eng.; Purdue Univ., 2005. 460 p.
3. *Katynina O.K., Kidin N.I., Kudryashov V.A., Umarov L.M.* // Intern. J. Self-Propagat. High-Temperature Synthesis. 2001. V. 10. № 1. P. 55–62.
4. *Кирдяшкин А.И., Поляков В.Л., Максимов Ю.М., Корогодов В.С.* // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 2. С. 61–67.
5. *Кирдяшкин А.И., Саламатов В.Г., Максимов Ю.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Габбасов Р.М.* // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. № 1. С. 132–135.
6. *Кирдяшкин А.И., Саламатов В.Г., Максимов Ю.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Габбасов Р.М.* // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44. № 6. С. 127–129.
7. *Гуревич М.М.* Фотометрия (теория, методы и приборы). М.: Энергоатомиздат, 1983. 137 с.
8. *Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C.* // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1993. V. 54. № 2. P. 181–342.