

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

А. И. Кирдяшкин<sup>1</sup>, В. М. Орловский<sup>2</sup>, Э. А. Соснин<sup>2</sup>, В. Ф. Тарасенко<sup>2</sup>,  
А. Н. Гуцин<sup>1</sup>, В. А. Панарин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, 634021 Томск, maks@dsms.tsc.ru

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, badik@loi.hcei.tsc.ru

Исследованы энергетические и спектральные характеристики инфракрасного излучения пористой металлокерамической горелки, изготовленной по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Показано, что в режиме фильтрационного горения природного газа лучистая энергоотдача горелки до двух раз превышает аналогичный параметр факельного сгорания и определяется интенсивностью излучения открытой поверхности металлокерамики и газообразных продуктов горения. Более 70 % энергии лучистого потока сосредоточено в диапазоне длин волн  $3 \div 11$  мкм. Максимальная плотность излучения достигает  $0.31$  МВт/м<sup>2</sup> при энергонапряженности горелки  $1.32$  МВт/м<sup>2</sup>.

Ключевые слова: фильтрационное горение, инфракрасное излучение, пористая металлокерамика, СВС.

### ВВЕДЕНИЕ

Процессы фильтрационного горения газов (ФГГ) находят применение в новых технологиях сжигания природных углеводородов, обеспечивающих снижение выбросов оксидов азота и увеличение плотности лучистой энергии. Отличительной особенностью ФГГ является эффект сгорания газов внутри пористой среды при фильтрационном подводе реагентов к зоне химического превращения [1–7]. Указанные процессы представляют интерес для создания экологически чистых компактных теплогенераторов и мощных источников инфракрасного излучения [8, 9]. Несмотря на значительный круг исследований, посвященных вопросам тепловой и химической динамики волны ФГГ, характеристики и механизм лучистого теплообмена изучены недостаточно полно. В частности, невыясненным остается соотношение мощностей различных источников излучения: свободной поверхности пористой среды и газовой фазы. Хотя в большинстве исследований энергетический вклад последнего источника не учитывается, в работе [10] отмечается, что при сжигании метана в высокопористых каталитических блоках поток излучения газообразных продуктов горения может достигать 50 % суммарного лучистого потока.

Дополнительная информация об эмиссионных свойствах систем ФГГ представляет интерес для разработки эффективных излучающих пористых горелок.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе проведены исследования состава и мощности излучения пористой горелки, изготовленной на базе пористой металлокерамики (ПМК), полученной из сплава Ni—Al методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Макроструктура ПМК представляла собой связанную систему пористостью  $0.6 \div 0.7$  в виде спаянных частиц округлой формы размером  $0.3 \div 1.5$  мм.

На рис. 1,а представлена схема пористой горелки. Круглая пластина ПМК площадью  $4800$  мм<sup>2</sup>, толщиной  $30$  мм помещалась в металлический корпус с водяным охлаждением. Через патрубки в горелку подавались природный газ и воздух, которые перемешивались во встречных потоках. Подготовленная топливная смесь (в соотношении объемов природный газ/воздух — 1/11) фильтровалась через пластину. После зажигания смеси устанавливался режим ФГГ с фронтом горения, расположенным в поровом пространстве ПМК вблизи внешней поверхности пластины. При минимальных уровнях мощности горелки за внешней поверхностью пластины наблюдался по-

Работа выполнена при поддержке интеграционного междисциплинарного проекта СО РАН № 78.

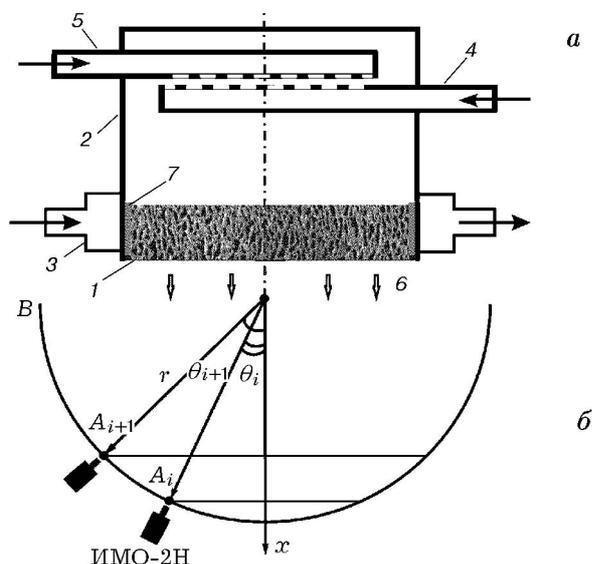


Рис. 1. Принципиальная схема горелки (а) и схема измерения мощности излучения горелки (б):

1 — пористая металлокерамическая пластина, 2 — корпус источника, 3 — водяная рубашка охлаждения, 4, 5 — патрубки напуска и смешения воздуха и углеводорода, 6 — выход излучения, 7 — уплотнение из минеральной ваты

ток практически прозрачных продуктов реакции (беспламенное горение), при максимальных — имел место выход пламени желтого цвета. В зависимости от мощности горелки и типа пластины последняя нагревалась до  $1000 \div 1700$  К.

При отключении подачи воздуха устанавливался факельный режим горения: сторание природного газа происходило над поверхностью пластины при взаимодействии с внешним воздухом. В этом случае температура пластины не превышала 670 К.

Применялся природный газ следующего состава: метан — 90.7 %, этан — 3.8 %, пропан — 1.7 %, азот — 2.5 %. Теплотворная способность газа  $q = 38800$  кДж/м<sup>3</sup>. Исследовались пластины двух типов. Пластина П1 — двуслойная: внешний слой толщиной 6 мм, диаметр пор  $0.5 \div 1.0$  мм; внутренний слой толщиной 24 мм, диаметр пор  $0.1 \div 0.5$  мм. Пластина П2 — перфорированная, на ее внешней поверхности имелись канавки шириной 2 мм и глубиной 6 мм, расположенные с шагом 10 мм в двух взаимно-перпендикулярных направлениях; толщина пластины 30 мм, диаметр пор  $0.1 \div 0.5$  мм.

Температура пластин с точностью  $\pm 2$  % измерялась хромель-алюмелевыми термопарами с диаметром спая  $0.8 \div 1.0$  мм, закрепленными на наружной поверхности пластин и внутри канавок.

Расход природного газа и воздуха с точностью  $\pm 1.5 \div 3.0$  % контролировался с помощью газовых счетчиков СГБМ-1,6, СГМН-1М.

На рис. 1, б показана схема измерения мощности излучения. В точках  $A_i$  на расстоянии  $r = 540$  мм располагалась приемная головка измерителя мощности ИМО-2Н (Волгоградский опытный завод «Эталон»), которая могла перемещаться по направляющей В. Излучающая часть горелки направлена вниз, чтобы конвективный поток горячих продуктов горения не попадал в измеритель мощности. Последнее обеспечивало регистрацию только оптической составляющей эмиссии горелки. Расстояние  $r$  соответствовало условиям измерений в приближении точечного источника излучения.

Устанавливая измеритель мощности под разными углами  $\theta_i$  относительно оси  $x$ , снимали диаграмму направленности излучения. Излучение горелки с достаточной степенью точности можно считать симметричным относительно оси  $x$ . Общую мощность излучения в полусфере  $2\pi$  вычисляли по формуле

$$P_r \approx \sum_i^{N-1} (R_i + R_{i+1}) \pi r^2 (\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1}), \quad (1)$$

где  $N$  — число углов,  $R_i$  — энергетическая освещенность измерителя мощности (Вт/см<sup>2</sup>) при  $\theta = \theta_i$ .

С учетом основных факторов, влияющих на точность измерений, относительная погрешность определения  $P_r$  по формуле (1) составила величину  $\delta \approx (\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2)^{0.5} \approx 8$  %, где  $\delta_1 \approx 5$  % — приборная погрешность измерения освещенности  $R_i$ ,  $\delta_2 \approx 3 \div 4$  % — погрешность измерения  $R_i$ , связанная с неточностью определения угла наблюдения ( $\Delta\theta_i = \pm 1^\circ$ ),  $\delta_3 \approx 4 \div 5$  % — погрешность, связанная с интерполяцией значений  $R$  между точками измерения.

Величину лучистой энергоотдачи оценивали по соотношению  $\eta = P_r/P$ , где  $P = Qq$  — общая тепловая производительность горелки,  $Q$  — расход природного газа.

Спектральный состав излучения в диапазоне  $0.6 \div 50$  мкм определяли с помощью светофильтров, устанавливаемых перед при-

Тепловые и эмиссионные характеристики пористой горелки

Тип пластины	Режим горения	$P$ , кВт	$P_r$ , кВт	$\eta$ , %	$T$ , К	$T_1$ , К	$P_{1-2}$ , кВт	$P_3$ , кВт	$\alpha$
П1	ФГГ, БП	2.07	0.56	27	1220	—	0.51	0.05	0.85
П1	ФГГ, БП	2.75	0.87	31	1430	—	0.81	0.06	0.71
П1	ФГГ, БП	3.95	1.10	28	1520	—	0.98	0.12	0.69
П1	ФГГ, БП	5.22	1.40	27	1580	—	1.23	0.17	0.72
П1	ФГГ, БП	6.32	1.52	24	1590	—	1.33	0.19	0.76
П2	ФГГ, П	2.87	1.11	39	1220	1400	0.86	0.25	1.10
П2	ФГГ, П	4.26	1.19	28	1390	1520	0.92	0.27	0.87
П2	ФГГ, П	5.60	1.22	22	1270	1540	0.92	0.30	0.86
П2	ФГГ, П	6.65	1.09	17	1270	1580	0.78	0.31	0.74
П1	Факельный	2.67	0.48	18	670	—	—	0.48	—

Примечание. БП, П — режимы без выхода и с выходом пламени за внешнюю поверхность пластины.

емной головкой ИМО-2М. Использовали светофильтры из кристаллических материалов (Ge, CaF<sub>2</sub>, ZnSe), стекла (КРС-5) и интерференционные узкополосные фильтры на длинах волн 5.5, 9.8 и 10.6 мкм с полушириной полосы пропускания 0.5 ÷ 0.6 мкм. При построении зависимости потока излучения от длины волны учитывались реальные характеристики пропускной и поглощающей способности светофильтров.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Излучение горелки определяется следующими источниками.

1. Тепловое излучение ПМК. В приближении температурной однородности пластины на масштабе одного калибра поры (0.1 ÷ 1.0 мм) величину предельной мощности данного излучения можно оценить по закону Стефана — Больцмана для абсолютно черного тела:

$$P_{\text{АЧТ}} = \sigma S[(1 - k)T^4 + kT_1^4],$$

где  $S$ ,  $T$  — площадь и температура внешней поверхности пластины,  $k$  — доля поверхности  $S$ , занятая канавками,  $T_1$  — температура ПМК в канавках,  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12}$  Вт/(см<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

2. Излучение газа, сгорающего во внешних порах и канавках пластины. Вместе с тепловым излучением ПМК, этот лучистый поток выходит с внешней поверхности пластины.

3. Излучение газа из области продуктов горения и пламени над внешней поверхностью пластины.

Как показали измерения (см. таблицу), величина лучистой теплоотдачи в режиме ФГГ может быть в два раза выше аналогичного параметра факельного горения и достигать значения  $\eta = 0.39$ . В режиме ФГГ значения  $R$  сильно уменьшаются с ростом  $\theta$  (рис. 2, кривые 1–5), что характерно для плоской излучающей поверхности. В режиме факельного горения величина  $R(\theta)$  изменяется слабо (рис. 2, кривая 6), что объясняется относительно изотропным излучением из объема факела. В последнем случае лучистый поток пластины незначителен в силу отсутствия горения в порах и малости температуры ПМК ( $T, T_1 \leq 650$  К).

Исходя из полученных данных можно оценить эмиссионные характеристики отдельных источников излучения горелки при ФГГ. Мощность излучения ( $P_3$ ) пламени и продуктов горения над пластиной определяется из измерений  $R$  при  $\theta = 90^\circ$ , когда исключается влияние лучистого потока от пластины\*. Считается, что указанный источник, так же как при факельном горении, дает примерно изотропное излучение,  $P_3 \approx 2\pi r^2 R(90^\circ)$ . Мощность излучения поверхности пластины:  $P_{1-2} \approx P_r - P_3$ . Эффективную степень черноты пластины определяем соотношением  $\alpha \approx P_{1-2}/P_{\text{АЧТ}}$ .

Из таблицы видно, что эмиссионные ха-

\* В соответствии с законом Ламберта интенсивность потока теплового излучения плоской поверхности твердого тела пропорциональна  $\cos\theta$ . Отсюда при  $\theta = 90^\circ$  излучением пластины можно пренебречь.

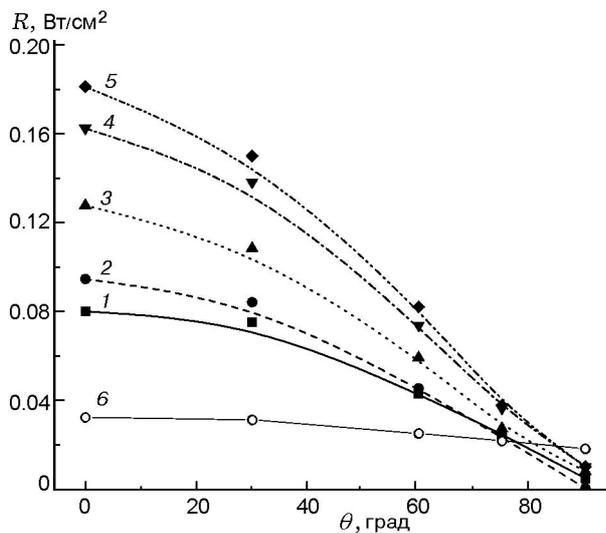


Рис. 2. Диаграмма направленности излучения горелки с пластиной П1:

режим ФГГ: 1 —  $P = 2.07$  кВт, 2 —  $2.75$  кВт, 3 —  $3.95$  кВт, 4 —  $5.22$  кВт, 5 —  $6.32$  кВт; режим факельный: 6 —  $P = 2.67$  кВт

характеристики горелки сильно зависят от общей тепловой производительности, что обусловлено температурой ПМК, изменением условий сгорания газа внутри и над поверхностью пластины. С ростом  $P$  увеличивается температура и уменьшается значение  $\alpha$ . Последнее нетипично для теплового излучения металлических материалов, степень черноты которых обычно

увеличивается с температурой [11]. Наблюдаемый эффект объясняется наличием лучистого потока газа из пор и канавок, который накладывается на тепловое излучение ПМК. Тогда уменьшение  $\alpha$  может быть обусловлено снижением интенсивности излучения газа, а величина  $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_{\min}$  характеризует его вклад в общий поток излучения пластины. Значение  $\Delta\alpha$  для пластины П2 больше, чем для пластины П1, что, вероятно, связано с улучшением условий выхода излучения газа за счет наличия канавок. Значение  $\alpha = 1.1 > 1$  для пластины П2 можно объяснить повышенной температурой газообразных продуктов горения  $T_g \gg T, T_1$ , а также неравновесным характером излучения реакционной волны. Этот факт требует дальнейших исследований.

О значительном энергетическом вкладе лучистого потока из газа свидетельствуют данные по спектральному составу излучения горелки. Как видно из рис. 3, максимальная спектральная плотность излучения реализуется в интервале больших длин волн по сравнению с абсолютно черным телом, при этом более 70 % энергии лучистого потока приходится на диапазон длин волн  $\lambda = 3 \div 11$  мкм. Это объясняется наличием селективных полос в области инфракрасных спектров излучения пламени вблизи  $\lambda = 4.4$  и  $2.8$  мкм [12]. Первая относится к антисимметричному колебанию  $\nu_2$  молекулы  $\text{CO}_2$ , вторая — к антисимметричному колебанию  $\nu_3$  молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ .

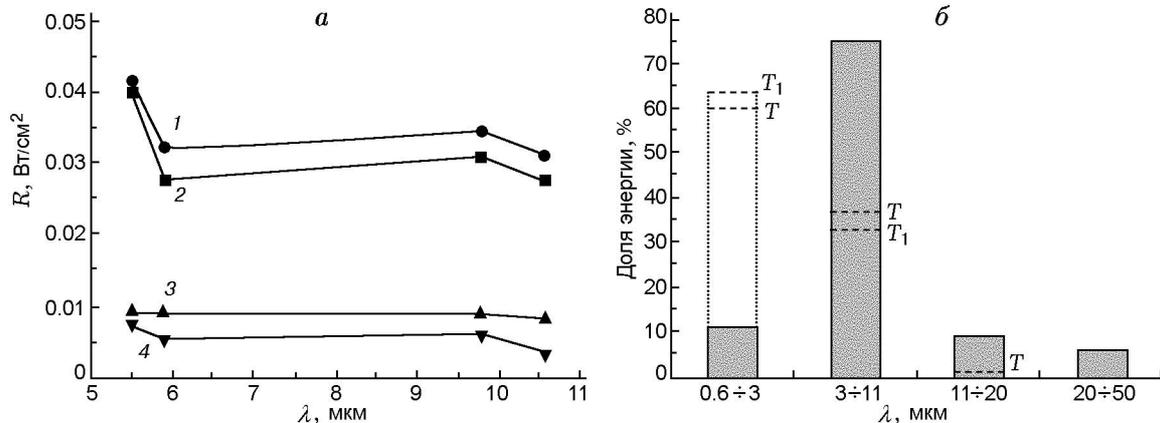


Рис. 3. Распределение энергии излучения горелки с пластиной П2 в режиме ФГГ по длинам волн:

*a* — данные измерений энергетической освещенности за интерференционными светофильтрами: 1 —  $P = 2.87$  кВт,  $\theta = 0$ , 2 —  $P = 6.65$  кВт,  $\theta = 0$ , 3 —  $P = 6.65$  кВт,  $\theta = 90^\circ$ , 4 —  $P = 2.67$  кВт,  $\theta = 90^\circ$ ; *b* — данные измерений энергетической освещенности за стеклянными и кристаллическими светофильтрами при  $P = 2.87$  кВт,  $\theta = 0$ ; пунктирные линии — характеристики излучения абсолютно черного тела, вычисленные по формуле Планка для температур  $T, T_1$

## ВЫВОДЫ

• Показано, что пористая горелка на базе металлокерамики в режиме фильтрационного горения газа обеспечивает лучистую энергоотдачу до 39 % от общей теплотворной способности природного газа.

• Установлено, что до 25 ÷ 40 % общего лучистого потока горелки определяют излучение газовой фазы (продукты горения вне горелки, волна горения в порах (канавках) металлокерамики), остальное — тепловое излучение поверхности пористой металлокерамики.

• Более 70 % энергии в излучение горелки вносит лучистый поток в диапазоне длин волн  $\lambda = 3 \div 11$  мкм. Это объясняется излучением газовой фазы с участием молекул  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Доброго К. В., Жданок С. А.** Физика фильтрационного горения газов. — Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ, 2002.
2. **Алдушин А. П., Мержанов А. Г.** Теория фильтрационного горения — общие представления, состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных системах. — Новосибирск: Наука, 1988.
3. **Бабкин В. С., Лаевский Ю. М.** Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 27–44.
4. **Какуткина Н. А., Мбрава М.** Переходные процессы при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 62–73.
5. **Лаевский Ю. М., Яушева Л. В.** Численное моделирование фильтрационного горения газа на основе двухуровневых полунейвных разностных схем // Вычислит. технологии. — 2007. — Т. 12, № 2. — С. 90–103.
6. **Алдушин А. П., Сеплярский Б. С.** Распространение волны экзотермической реакции в пористой среде при продувке газа // Докл. АН СССР. — 1978. — Т. 241, № 1. — С. 72–73.
7. **Футько С. И., Жданок С. А.** Химия фильтрационного горения газов. — Минск: Бел. наука, 2004.
8. **Левин А. М.** Исследование и применение газовых горелок инфракрасного излучения // Теория и практика сжигания газов. — Л.: Недра, 1964. — С. 455–477.
9. **Industrial burners handbook / Ch. E. Baukal (Ed.).** — CRC PRESS, 2004.
10. **Анциферов В. Н., Храмцов В. Д., Поливода А. И. и др.** Высокопористые проницаемые ячеистые материалы для экологически безопасных теплогенераторов // Перспективные материалы. — 2008. — № 6. — С. 5–10.
11. **Криксунов Л. З.** Справочник по инфракрасной технике. — М.: Сов. радио, 1978.
12. **Гейдон А.** Спектроскопия пламен. — М.: Изд-во иностр. лит., 1959.

*Поступила в редакцию 10/XI 2009 г.*