

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

А. И. Кирдяшкин¹, В. М. Орловский², Э. А. Соснин², В. Ф. Тарасенко²,
А. Н. Гуцин¹, В. А. Панарин²

¹Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, 634021 Томск, maks@dsm.tsc.ru

²Институт 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^2 при энергонапряженности горелки 1.32 МВт/м^2 .

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^2 , 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.

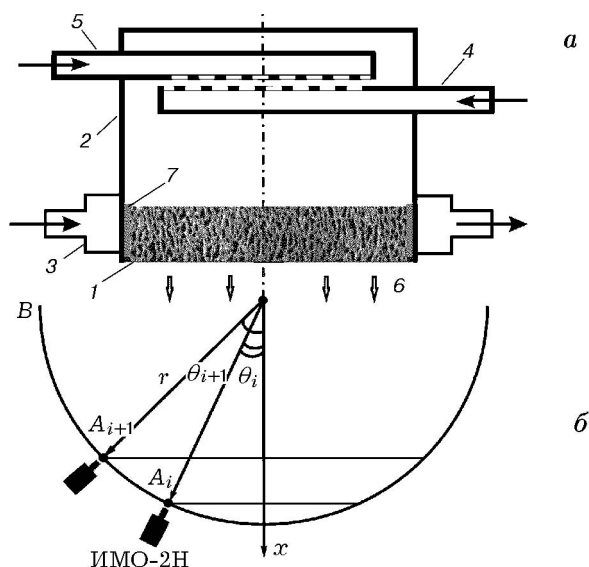


Рис. 1. Принципиальная схема горелки (а) и схема измерения мощности излучения горелки (б):

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 1 000 ÷ 1 700 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 $q = 38\,800$ кДж/м³. Исследовались пластины двух типов. Пластина П1 — двуслойная: внешний слой толщиной 6 мм, диаметр пор 0.5 ÷ 1.0 мм; внутренний слой толщиной 24 мм, диаметр пор 0.1 ÷ 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 ÷ 0.5 мм.

Температура пластин с точностью ± 2 % измерялась хромель-алюмелевыми термопарами с диаметром спая 0.8 ÷ 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 θ_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 2π 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/см²) 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 ÷ 50 мкм определяли с помощью светофильтров, устанавливаемых перед при-

Тепловые и эмиссионные характеристики пористой горелки

| Тип пластины | Режим горения | P , кВт | P_r , кВт | η , % | T , К | T_1 , К | P_{1-2} , кВт | P_3 , кВт | α |
|--------------|---------------|-----------|-------------|------------|---------|-----------|-----------------|-------------|----------|
| 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, CaF₂, 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/(см² · К⁴).

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 θ (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.

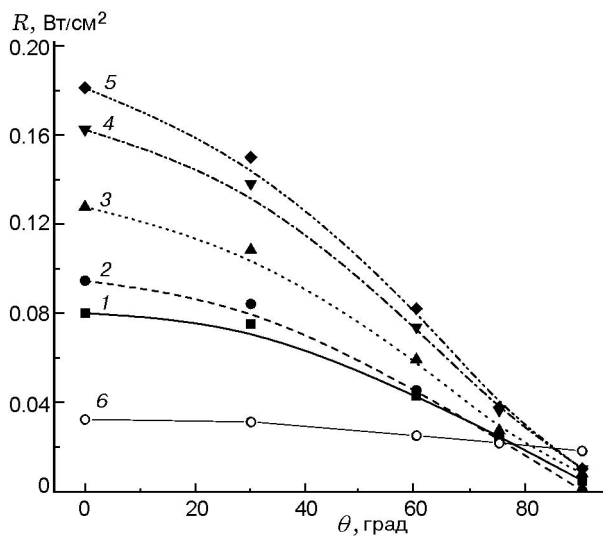


Рис. 2. Диаграмма направленности излучения горелки с пластиной П1:

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 α . 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 α 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 ν_2 молекулы CO_2 , вторая — к антисимметричному колебанию ν_3 молекулы H_2O .

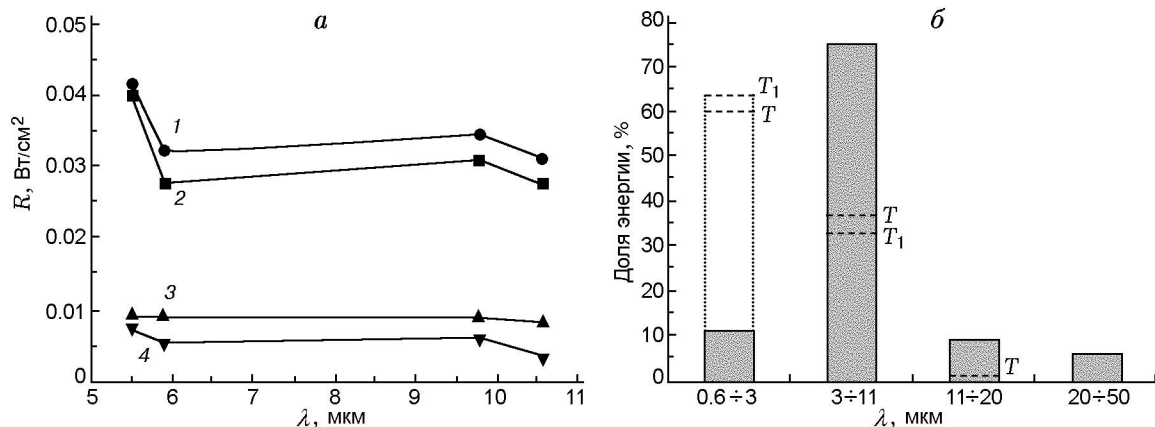


Рис. 3. Распределение энергии излучения горелки с пластиной П2 в режиме ФГГ по длинам волн:

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 CO_2 , H_2O .

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.