

УДК 535.8; 5444.522.15

Особенности лучистой энергоотдачи пористой газовой горелки с металлокерамическим конвертером

В.М. Орловский³, А.И. Кирдяшкин², Ю.М. Максимов²,
В.К. Баев¹, А.Н. Гущин^{2*}

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

²Томский научный центр СО РАН, отдел структурной макрокинетики
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

³Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

Поступила в редакцию 15.10.2011 г.

Исследовались энергетические и спектральные характеристики излучения пористой горелки с конвертером на основе интерметаллидных соединений Ni–Al. Установлено, что общая лучистая энергоотдача горелки при работе на природном газе достигает 60% от калорийности топлива, а плотность потока излучения – 30 Вт/см². Показано, что до 65% энергии излучения сосредоточено в диапазоне длин волн 3–12 мкм. Из анализа полученных данных следует, что потоки излучения от твердой поверхности конвертера и от газообразных продуктов горения имеют сопоставимые величины. Соотношение потоков меняется в зависимости от конфигурации и геометрии конвертера и скорости подачи топливной смеси, что объясняется изменениями теплового режима волны фильтрационного горения. Здесь эффективная излучательная температура продуктов горения и твердой поверхности определяется параметрами энергообмена между газовым потоком и конвертером.

Ключевые слова: фильтрационное горение газов, пористая горелка, спектральные характеристики излучения; filtration burning of gases, porous burner, spectral characteristics of radiation.

Введение

Процессы фильтрационного горения газов (ФГГ) находят применение в новых технологиях сжигания природных углеводородов, обеспечивающих снижение выбросов оксидов азота и увеличение выхода 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 мощности различных источников излучения: свободной поверхности конвертера и газовой фазы. Хотя в большинстве исследований энергетический вклад последнего источника не учитывается, в ра-

боте [10] отмечается, что при сжигании метана в высокопористых каталитических блоках поток излучения газообразных продуктов горения может достигать 50% от суммарного лучистого потока. Дополнительная информация об эмиссионных свойствах систем ФГГ представляет интерес для разработки эффективных излучающих пористых горелок.

1. Исследуемые материалы керамических горелок и методы измерений

В качестве конвертера для горелки применялись изделия из пористой металлокерамики (ПМК) на основе сплава Ni–Al, изготовленные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Макроструктура ПМК представляла собой систему спаянных частиц округлой формы размером 0,3–1,5 мм, имеющую пористость 0,6–0,7.

Исследовались конвертеры в виде пластин следующих типов: П1 – двухслойная, внешний слой толщиной 6 мм, диаметр газотранспортных пор 0,5–1,0 мм, внутренний слой толщиной 24 мм, диаметр газотранспортных пор 0,1–0,5 мм; П2 – однослойная, на внешней поверхности пластины пропилы (ширина 2 мм, глубина 6 мм, шаг 10 мм) в двух аксиальных направлениях, толщина пластины 30 мм,

* Виктор Михайлович Орловский (orlovskii@loi.hcei.tsc.ru); Александр Иванович Кирдяшкин; Юрий Михайлович Максимов; Владимир Константинович Баев (baev@itam.nsc.ru); Александр Николаевич Гущин.

диаметр газотранспортных пор 0,1–0,5 мм; ПЗ – профилированная, внешняя поверхность образована пирамидами 4 × 4 мм по основанию и 2 мм по высоте, толщина пластины 30 мм.

Исследовался конвертер сферической формы (ПС) диаметром 80 мм, состоящий из внешней сферы толщиной 6 мм с размером транспортных пор 0,1–0,5 мм и внутренней сферой толщиной 15 мм с размером транспортных пор 0,2 мм. Также изучены комбинированные конвертеры в виде пластины П1, на выходной части которой размещались пакеты кварцевых (П1К1 и П1К2 – высота пакета соответственно 48 и 23 мм) и керамических (П1К3 – высота пакета 25 мм) трубок, а также пакеты из ячеисто-пористого никеля (П1Н – высота пакета 20 мм, пористость 0,92) и пакета из пяти фехралевых сеток из проволоки диаметром 2 мм и ячейкой 4 × 4 мм (П1Ф – высота пакета 22 мм).

В опытах применялся природный газ следующего состава: метан – 92, этан – 3,8, пропан – 1,7, азот – 2,5%. Теплотворная способность газа q равна 38800 кДж/м³.

Температура конвертера измерялась на наружной поверхности пластины (сферы) с помощью хромель-алюмелевых термопар с диаметром спаев 0,8–1,0 мм. Расход воздуха и природного газа контролировался газовыми счетчиками СГБМ-1,6, СГМН-1М.

Энергетические характеристики излучения получали с помощью измерителя мощности ИМО-2Н (Волгоградский опытный завод «Эталон») по схеме, описанной в работе [11]. Приемная головка измерителя располагалась на расстоянии $r = 540$ мм и могла перемещаться по круговой направляющей. Излучающая часть горелки была 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. Диаграмму направленности излучения снимали измерителем мощности, установленным под разными углами θ_i относительно оси x . Излучение горелки с большой степенью точности можно считать симметричным относительно оси x . Общий поток излучения вычисляли по формуле

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

где N – число углов; R_i – энергетическая освещенность измерителя мощности (Вт/см²) при θ_i . Для сферического конвертера измерения излучения объекта производились в угловом диапазоне 4π , для плоских конвертеров – в диапазоне 2π .

Коэффициент полезного действия лучистой энергоотдачи горелки оценивали по соотношению $\eta = (P/P_{\text{зап}}) \cdot 100\%$, где $P_{\text{зап}} = Q_N q$ – общая тепловая производительность горелки; Q_N – расход природного газа.

Вклады свободной поверхности конвертера и газообразных продуктов горения в лучистую энергоотдачу $P_{\text{газ}}$ горелки определяли как разницу измеренного общего потока излучения горелки P и суммарной мощности излучения конвертера $P_{\text{кон}}$, рассчитанного по закону Стефана–Больцмана.

Для определения спектральных параметров излучения 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. Кроме того, использовался Фурье-спектрометр (модель «ФТ-801») с рабочим спектральным диапазоном 2–18 мкм.

2. Результаты и их обсуждение

Как показали исследования, после зажигания топливной смеси в горелке устанавливался режим ФГГ, где фронт горения находился в поровом пространстве ПМК вблизи внешней поверхности конвертера. При минимальных уровнях мощности горелки за внешней поверхностью конвертера наблюдался поток практически прозрачных продуктов реакции (беспламенное горение), при максимальных – имел место выход пламени желтого цвета. В зависимости от $P_{\text{зап}}$ и типа пластины происходит нагрев приповерхностного слоя конвертера до 1000–1700 К. Исследования при использовании конвертера П2 в диапазоне тепловой производительности 2,5–6,8 кВт показали, что мощность горелки растет слабо, хотя и превышает 1 кВт, а эффективность монотонно снижается с ростом скорости расхода газа. Рост скорости расхода газа приводил к увеличению высоты горения факела, которая составляла 0,5; 2; 12 и 22 см для тепловой производительности 2,48; 4,03; 5,43 и 6,82 соответственно. Только при тепловой производительности 2,48 кВт энергия излучения горелки была выше энергии абсолютно черного тела при той же температуре, что у поверхности горелки. При этом максимальное значение энергии было сосредоточено в области 3–12 мкм. При больших расходах, вероятно, пламя экранирует излучение в указанном диапазоне длин волн.

Для исследования влияния обмена лучистой энергией над поверхностью горелки на спектральные и пространственные характеристики излучения использовались различные геометрические конфигурации горелок при фиксированной тепловой производительности горелки.

На рис. 1 дано сравнение спектральных распределений энергий излучения горелок различной конфигурации в режиме ФГГ по длинам волн и по углу наблюдения. Видно, что для П1, П1К3 с керамическими трубками и П1Н-пакетов из ячеисто-пористого никеля с линейно-пористой структурой максимум излучения приходится на диапазон длин

волн 3–12 мкм. Для П1К1 и П1К2 с кварцевыми трубками происходит смещение максимума излучения в область 0,5–3 мкм тем более выраженное, чем больше высота пакета. Согласно рис. 1, б направленность излучения в этом случае возрастает.

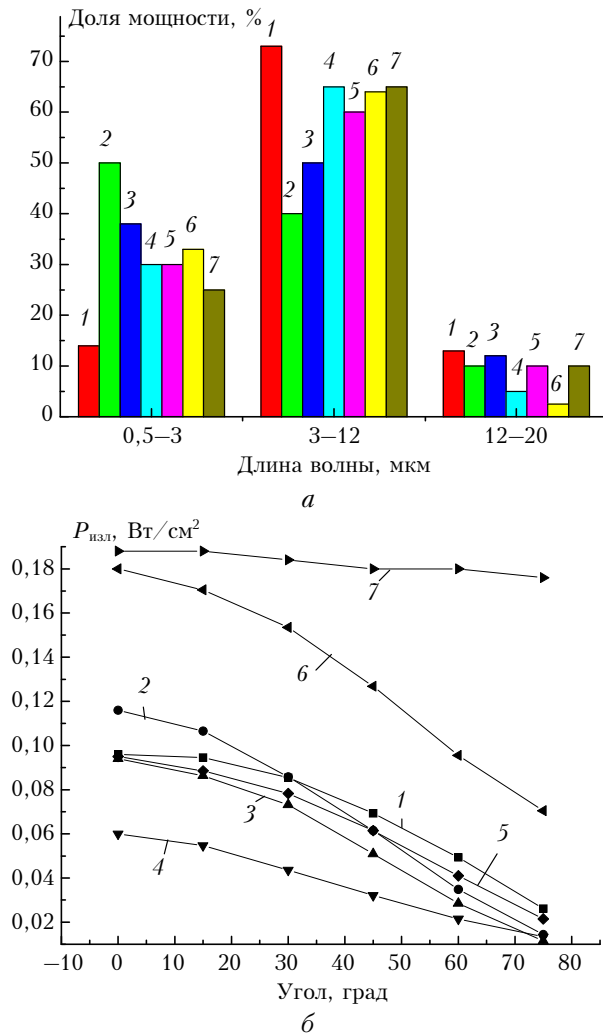


Рис. 1. Распределение излучения горелки в режиме ФГТ по длинам волн (а) и по секторам (б) для различных рассеивающих элементов: 1 – П1; 2 – П1К1 с пакетом кварцевых трубок высотой 48 мм; 3 – П1К2 с пакетом кварцевых трубок высотой 23 мм; 4 – П1К3 с пакетом керамических трубок высотой 25 мм; 5 – П1Н с пакетом линейно-пористой структуры высотой 20 мм; 6 – П1Ф с набором пяти фехральных сеток; 7 – ПС-поверхность в виде сферы. Тепловая производительность горелки 2,48 кВт, для горелки с пятью фехральными сетками – 6,25 кВт

Возможной причиной указанного смещения спектра для кварцевого пакета является обмен лучистой энергией между каналами трубок в пакете в отличие от керамических пакетов, где обмен имеет диффузионный характер.

Из сказанного следует, что дальнейшее увеличение мощности излучения горелки можно реализовать, организовав теплообмен в пористых структурах, включающих как свободные поверхности твердых

элементов, так и газообразные продукты горения. Например, если в конфигурации П1Ф разместить несколько слоев металлических решеток, то удастся увеличить мощность излучения с 1 до 1,6 кВт. При этом происходит увеличение доли энергии в диапазоне спектра 0,5–3 мкм.

Таким образом, излучение горелки содержит излучение от конвертера и газообразных продуктов горения. Для выяснения динамики изменения энергии излучения, КПД и роли каждого компонента излучения были проведены опыты для различных излучателей: П1 – плоский конвертер, ПЗ – плоский конвертер с пирамидальной поверхностью и ПС – поверхность в виде двухслойной сферы (рис. 2). Опыты проводились для удельной тепловой производительности горелки в диапазоне 10–100 Вт/см².

Интенсивность излучения с возрастанием удельной тепловой производительности для всех видов горелок имела две стадии – быстрое нарастание и медленный переход к насыщению. Точка раздела быстрого и медленного нарастания интенсивности излучения плоского конвертера и плоского конвертера с поверхностью, образованной пирамидами, соответствовала 30 Вт/см² удельной тепловой производительности, а для градиентного конвертера со сферической поверхностью – 45 Вт/см² (рис. 2, кривая 1).

Максимум общего КПД излучения горелки (рис. 2, кривая 2) совпадал с точкой раздела нарастания интенсивности излучения плоского конвертера, плоского конвертера с поверхностью, образованной пирамидами, конвертера со сферической поверхностью и составлял 49, 49 и 60,8% соответственно. Максимум плотности мощности излучения горелок в указанной выше последовательности составлял 25, 21 и 35 Вт/см².

Коэффициент полезного действия излучения от конвертера и газовой составляющей горелки представлен кривыми 4 и 5 (рис. 2). Коэффициент полезного действия решетки излучения плоского конвертера и плоского конвертера с поверхностью, образованной пирамидами, имел максимум, который совпадал с максимумом температуры конвертера (рис. 2, а, б, кривая 3). Коэффициент полезного действия газовой составляющей уменьшался для удельной тепловой производительности горелки в диапазоне 10–30 Вт/см² и далее оставался приблизительно на одном уровне. Соотношения излучения конвертера и газовой составляющей выше указанных конфигураций горелки менялись таким образом, что в максимуме КПД суммарного излучения они составляли 32 и 17% при $P_{зап} = 30$ Вт/см², 50 и 50% при 50 Вт/см² и 16 и 4% при 100 Вт/см². Такая динамика эффективности обусловлена тем, что при тепловой производительности более 50 Вт/см² уменьшается доля излучения от решетки. Это связано с уменьшением отдачи тепла «пора–решетка» при увеличении расхода газа.

Для конвертера с поверхностью в виде сферы КПД излучения имеет слабо выраженный максимум в области максимального КПД излучателя и далее незначительно уменьшается.

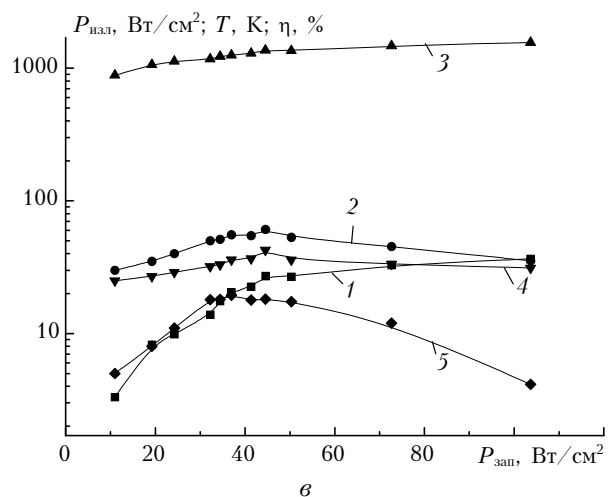
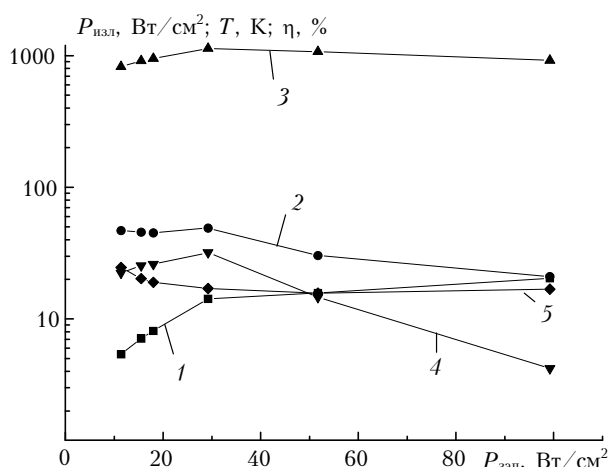
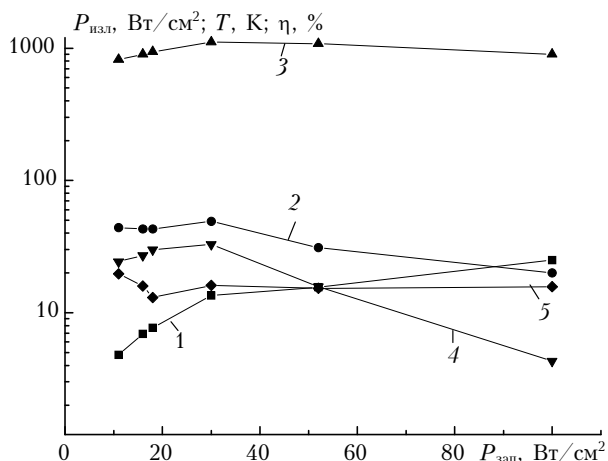


Рис. 2. Зависимость удельной мощности излучения $P_{\text{изл}}$ горелки (1), суммарного кпд излучения η (2), температуры поверхности горелки T (3), кпд излучения с поверхности конвертера $\eta_{\text{кон}}$ (4), кпд излучения газовой составляющей горелки $\eta_{\text{газ}}$ (5) от удельной тепловой производительности горелки $P_{\text{зап}}$: *a* — для плоского конвертера П1; *б* — для плоского конвертера с поверхностью, образованной пирамидами 4×4 мм по основанию и 2 мм по высоте и направленной внутрь поверхности пластины П3; *в* — для конвертера со сферической поверхностью ПС

Коэффициент полезного действия газовой составляющей имеет максимум в области максимального кпд излучателя и далее резко уменьшается. Их соотношения таковы: 42,6 и 18,2 ($P_{\text{зап}} = 45 \text{ Вт/см}^2$), 31 и 4% ($P_{\text{зап}} = 100 \text{ Вт/см}^2$).

Спектральный состав для градиентного излучателя сферической формы контролировался Фурье-спектрометром. Для выявления соотношения потока излучения от твердой поверхности конвертера и от газообразных продуктов горения для данной геометрической конфигурации спектр снимался через каждые 2 с после отключения градиентного излучателя сферической формы. На рис. 3 представлены спектры излучения для времени, равного 0 и 8 с соответственно.

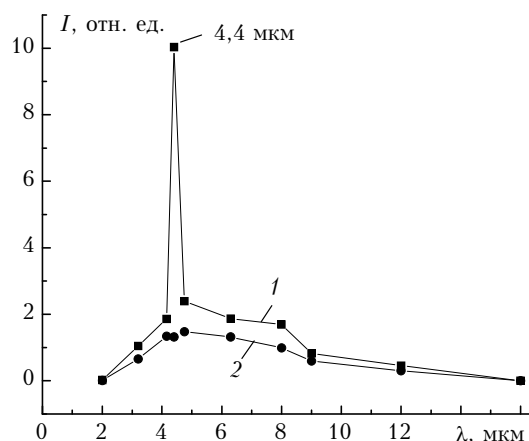


Рис. 3. Зависимость плотности излучения сферического излучателя ПС от длины волны для включенной горелки (кривая 1) и выключенной спустя 8 с (кривая 2). Измерения на Фурье-спектрометре, модель «ФТ-801»

Видно, что первоначально до 70% энергии излучения сосредоточено в диапазоне длин волн 3–12 мкм. К 8-й с, когда излучение обеспечивается только конвертером, исчезает пик излучения в области 4,4 мкм и мощность излучателя уменьшается в 3 раза. При этом температура поверхности излучателя за это время уменьшается на $\sim 343 \text{ К}$, что соответствует уменьшению лучистой энергии от конвертера примерно на 30%. Из анализа полученных данных следует, что потоки излучения от твердой поверхности конвертера и от газообразных продуктов горения имеют сопоставимые величины.

Оценка динамики изменения удельной мощности по спектральному составу излучения горелки показывает, что в диапазоне 4,15–4,75 мкм сосредоточено до 23% интегральной энергии. Возможно, эта полоса обусловлена полосой поглощения CO_2 на $\lambda = 4,2 \text{ мкм}$, образующегося в продуктах сгорания CH_4 , которая сдвинута в область 4,4 мкм за счет нелинейно-оптических эффектов, происходящих в поровых средах. Первопричиной увеличения излучения от газообразных продуктов горения, возможно, является резкое уменьшение газовой температуры за счет отдачи тепла конвертеру и тем самым деформации заселенности энергетических уровней молекулы двуокиси углерода.

Соотношение потоков меняется в зависимости от конфигурации и геометрии конвертера и скорости подачи топливной смеси, что объясняется изменениями теплового режима волны фильтрационного горения. Здесь эффективная излучательная температура продуктов горения и твердой поверхности определяется параметрами энергообмена между газовым потоком и конвертером.

Заключение

Установлено, что общая лучистая энергоотдача горелки при работе на природном газе достигает 60% от калорийности топлива, а плотность потока излучения – 30 Вт/см², до 70% энергии излучения сосредоточено в диапазоне длин волн 3–12 мкм.

Структурирование потоков газа над ПМК позволяет увеличивать лучистый поток и варьировать направленность и спектральный состав излучения. Так, в структурах с кварцевыми трубками максимум излучения смещен в область 0,5–3 мкм.

Зависимость соотношения потоков излучения твердой поверхности конвертера и газообразных продуктов горения от конфигурации, геометрии конвертера и скорости подачи топливной смеси объясняется изменениями теплового режима волны фильтрационного горения, а эффективная излучательная температура продуктов горения и твердой поверхности определяется параметрами энергообмена между газовым потоком и конвертером.

1. *Доброго К.В., Жданок С.А.* Физика фильтрационного горения газов. Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, 2002. 203 с.

2. *Алдушин А.П., Мержанов А.Г.* Теория фильтрационного горения – общие представления, состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных системах. Новосибирск: Наука, 1988. 952 с.
3. *Бабкин В.С., Лаевский Ю.М.* Фильтрационное горение газов // Физ. горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 27–44.
4. *Кауткина Н.А., Мбрава М.* Переходные процессы при фильтрационном горении газов // Физ. 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 // Вычисл. технол. 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. Минск: Белю наука, 2004. 319 с.
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* / Ed. by Charles E. Baukal. CRC Press, 2004. 790 p.
10. *Анциферов В.Н., Храпцов В.Д., Поливода А.И., Волков Э.П., Цой Г.А., Бевз А.П.* Высокопористые проницаемые ячеистые материалы для экологически безопасных теплогенераторов // Перспективные материалы. 2008. № 6. С. 5–10.
11. *Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М., Орловский В.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Гуцин А.Н., Панарин В.А.* Энергетические и спектральные характеристики процесса фильтрационного горения газа в пористой металлокерамике // Физ. горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 5. С. 37–41.

V.M. Orlovskii, A.I. Kirdyashkin, Yu.M. Maksimov, V.K. Baev, A.N. Gushchin. Features of radiant power-conversion efficiency of the porous gas torch with the ceramic-metal converter.

Power and spectral characteristics of radiation of a porous torch with the converter on a basis of ceramic-metal Ni–Al compounds were investigated. It is established that the general radiant conversion efficiency of a torch, working with natural gas, reaches 60% from caloric content of fuel, and power density of a stream of radiation, 30 Wt/sm². It is shown that up to 65% of energy of radiation is concentrated in a wavelength range of 3–11 microns. From the analysis of the received data it follows that streams of radiation from a firm surface of the converter and from gaseous products of burning have comparable values. The parity of streams varies depending on a configuration and geometry of the converter and speed of supply of a fuel mix that is accounted by changes the thermal mode of the filtration burning wave. Here, the effective radiating temperature of products of burning and a firm surface are defined by power exchange of parameters between the gas stream and the converter.