

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 536.46; 662.983

РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ГОРЕНИЯ В ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2020 г. В. М. Шмелев*

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: krupkin49@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.03.2020;
после доработки 23.03.2020;
принята в печать 20.04.2020

Предложен способ расширения области устойчивого поверхностного горения в горелочном устройстве инфракрасного излучения путем регулирования температуры поверхности матрицы. Регулирующая система обеспечивала практически постоянную температуру излучающей поверхности матрицы при периодическом изменении коэффициента избытка воздуха в интервале от 1.05 до 1.8. Для матрицы из гофрированной металлической фольги обеспечивалось стабильное поверхностное горение смеси природного газа с воздухом без “проскока” и возникновения “голубого пламени” в области параметров, где стационарное горение в ИК-моде невозможно. Стабильное поверхностное горение в ИК-моду реализовано при удельной мощности до $< 80 \text{ Вт/см}^2$ и температуре излучающей поверхности матрицы $\sim 1000^\circ\text{C}$. Проведено сравнение стационарного и регулируемого нестационарного режимов горения на матрице из пенометалла с сетчатым радиационным экраном. Показано, что при удельной мощности горения $< 80 \text{ Вт/см}^2$ средние значения радиационного потока и эффективной температуры излучателя, эквивалентные параметрам при стационарном горении, лежат в области регулирования. При $w > 80 \text{ Вт/см}^2$ указанные параметры лежат выше области регулирования, поэтому для достижения оптимального режима нестационарного горения необходимо увеличивать скважность импульсов регулирования с возрастанием удельной мощности горения.

Ключевые слова: эффективное сжигание газа, инфракрасное горелочное устройство, стабилизация горения, регулирование горения.

DOI: 10.31857/S0207401X20120122

ВВЕДЕНИЕ

Горение газовых смесей на поверхности проницаемой матрицы в инфракрасных горелочных устройствах более экологично по сравнению с факельным сжиганием газа, однако проигрывает в удельной мощности тепловыделения [1–7]. В современных горелочных устройствах инфракрасного излучения с проницаемыми металлическими матрицами и рекуперативными элементами достигнуты значения удельной мощности горения в ИК-моду до 100 Вт/см^2 , в основном на обедненных смесях [8–12]. Требования, предъявляемые к современным теплоэнергетическим системам с горелочными устройствами инфракрасного излучения, связаны с достижением максимального радиационного КПД при максимальной мощности горения, однако они вступают в противоречие друг с другом.

Использование смесей стехиометрического состава, обеспечивающих максимальную темпе-

ратуру излучающей поверхности матрицы, при увеличении мощности горелочного устройства приводит к возникновению неустойчивости поверхностного горения. В зависимости от материала и конструкции матрицы возможно развитие неустойчивости в виде так называемого “проскока” или перехода горения из ИК-моды в режим “голубого пламени”. В первом случае фронт пламени проникает в матрицу и горение возникает с обратной стороны матрицы; во втором – пламя отдалается от матрицы и при увеличении расхода смеси отрывается от нее.

Возникает вопрос: нельзя ли расширить область устойчивого поверхностного горения в ИК-моду, перейдя от стационарного горения к нестационарному, т.е., используя метод аппаратного контроля, удерживать фронт пламени в заданной координате? Существующие методы аппаратного контроля горения применяются для обеспечения стабильных параметров стационарного горения при заданном отношении между го-

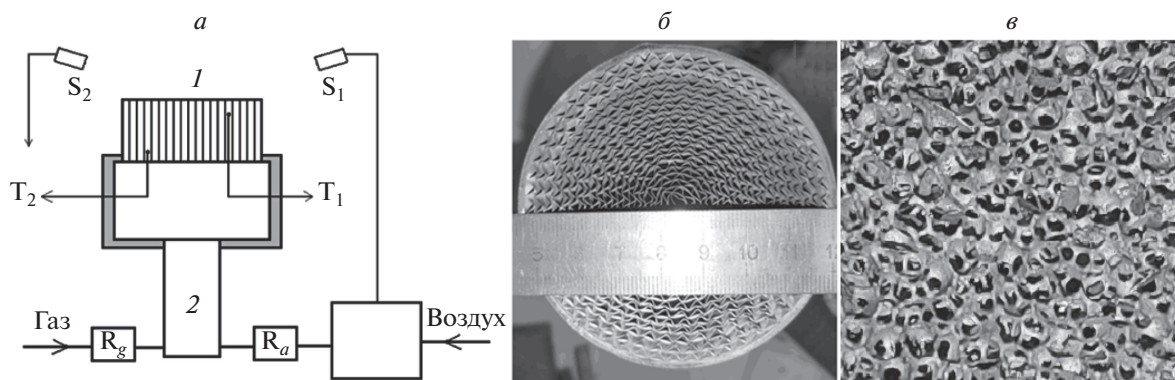


Рис. 1. *a* – Схема экспериментальной установки, *б* – фото спиральной матрицы, *в* – фотоматрицы из пенометалла.

рючим и окислителем в области устойчивого горения, а также к контролю погасания пламени [13, 14]. Система контроля с помощью датчиков давления следит за тем, чтобы колебания давления газа и воздуха не выходили за пределы заданного интервала. Ионизационный датчик контролирует наличие пламени. Эти методы направлены не на стабилизацию фронта пламени в пространстве, а на стабилизацию коэффициента избытка воздуха. В данной работе рассматривается вопрос именно о стабилизации фронта пламени в пространстве.

Стабилизацию фронта пламени легко осуществить в случае, например, распространения пламени по горючей смеси в трубе путем регулирования встречного потока газа с помощью оптического или теплового датчика, отслеживающего положение фронта пламени. Фронт пламени остановится, когда скорость встречного потока будет равна его скорости. Другое дело – если между набегающим потоком горючей смеси и фронтом пламени расположена проницаемая матрица и пламя при контакте с ней передает ей часть своей тепловой энергии. Скорость фронта пламени, определяемая его температурой, зависит от условий взаимодействия с проницаемой матрицей. Может реализоваться случай, когда увеличение скорости газового потока приведет к обратному эффекту – возрастанию скорости фронта пламени и проникновению его вглубь матрицы, т.е. невозможно будет зафиксировать фронт пламени у поверхности матрицы.

В настоящей работе рассмотрен способ стабилизации фронта пламени у поверхности проницаемой матрицы горелочного устройства инфракрасного излучения путем регулирования потока воздуха, позволяющий реализовать устойчивый процесс поверхностного горения в ИК-моде при высокой удельной мощности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Экспериментальные исследования по горению смеси природного газа с воздухом проводили на макете горелочного устройства (рис. 1*a*) с двумя типами матриц – спиральной матрицей (рис. 1*б*), изготовленной по технологии спиральной накрутки гофрированной металлической фольги толщиной 0.2 мм, и матрицей из пенометалла (рис. 1*в*). В спиральной матрице (1) характерный размер ячеек составлял ~1.8–2 мм. Диаметр матрицы – 72 мм, высота – 40 мм. Матрица заключена в стальной тонкостенный стакан с толщиной стенки 2 мм, который устанавливался в верхней части горелочного устройства. Масса матрицы со стаканом составляла 170 г. При использовании данной матрицы с большим диаметром каналов при малом коэффициенте избытка воздуха возникала тепловая неустойчивость горения – “проскок” пламени в матрицу.

При использовании другой матрицы из пенометалла (рис. 1*в*) (диаметр – 60 мм, толщина – 7 мм, характерный диаметр пор – 0.2 мм, поверхностная проницаемость – 0.3) в аналогичных условиях реализовывалась ИК-мода в ограниченной области мощности горения. Для расширения области горения в ИК-моде использовали радиационный экран в виде сетки из фехрелевой проволоки диаметром 0.4 мм с шагом ячейки 4 мм. Экран устанавливали на расстоянии 4 мм от поверхности матрицы.

К нижней части горелочного устройства крепился смеситель (2), к которому подводился природный газ из городской магистрали и воздух, нагнетаемый центробежным вентилятором (3) с электронным блоком управления частотой оборотов. Расходы газа и воздуха измерялись откалиброванными ротаметрами R_g и R_a соответственно. Соотношение компонентов могло варьироваться в широком диапазоне при изменении коэффициента избытка воздуха α от 1 до 2.

На расстоянии около 80 см от излучающей поверхности матрицы устанавливали два датчика S_1 и S_2 . Датчик S_1 представлял собой точечный ИК-фотодиод BPV10NF (Vishay Intertechnology, Германия), напряжение которого, пропорциональное радиационному потоку с поверхности матрицы, контролировало расход воздуха с помощью электронного блока управления. С увеличением температуры излучающей поверхности T_s до заданной величины, устанавливаемой порогом срабатывания электронной схемы, расход воздуха при фиксированном расходе горючего скачком увеличивался на определенную величину, максимально возрастал в два раза. Это приводило к снижению температуры излучающей поверхности. При достижении температуры T_s исходного значения скачком устанавливался первоначальный расход воздуха. Таким образом, осуществлялась стабилизация поверхностного горения и предотвращалось развитие тепловой неустойчивости. Интегральная плотность потока излучения от матрицы в спектральном диапазоне от видимого света до примерно 14 мкм контролировалась пирометрическим датчиком S_2 марки IRA-E710ST1 (Япония). Датчиком измеряли поток излучения в узкой апертуре с центральной части поверхности матрицы. Для определения температуры рабочей поверхности спиральной матрицы или эффективной температуры излучателя — матрицы из пенометалла с сеткой — использовали радиационный пирометр AR882 (Китай) с рабочей полосой 8–14 мкм. С помощью газового анализатора TESTO 335 (Германия) измеряли концентрации вредных примесей (оксидов азота и монооксида углерода) в продуктах сгорания газозооной смеси над спиральной матрицей. Зонд газового анализатора диаметром 4 мм размещался над поверхностью матрицы в центральной части на расстоянии 10 мм от ее поверхности.

Для контроля температуры спиральной матрицы внутри нее устанавливали две стандартные термопары T1 и T2 К-типа толщиной 1 мм на расстоянии $\approx 1/3$ высоты матрицы от верхней и нижней ее поверхностей соответственно. При использовании матрицы из пенометалла термопара T1 толщиной 1 мм прикреплялась к сетке (радиационному экрану), а термопара T2 толщиной 200 мкм приклеивалась к обратной стороне матрицы. Сигналы от термопар и датчика S_2 , а также управляющий сигнал на центробежный вентилятор записывались на компьютерном 8-канальном осциллографе Hantek 1008 (Китай).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Матрица из гофрированной металлической фольги

Как показали эксперименты, устойчивое горение в ИК-моду на поверхности гофрированной

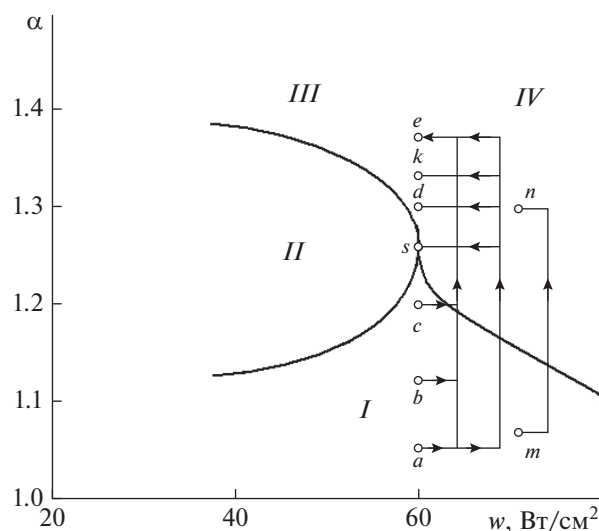


Рис. 2. Области горения и пути регулирования: I — “проскок”, II — ИК-моду, III — “голубое пламя”, IV — отрыв пламени от матрицы.

металлической матрицы (рис. 1б) возможно, в основном, на обедненной смеси при удельной мощности горения w до 60 Вт/см² внутри области II. Граница области развития тепловой неустойчивости представлена на рис. 2 нижней ветвью кривой зависимости $\alpha = \alpha(w)$. При фиксированной мощности горения увеличение коэффициента избытка воздуха приводит к трансформации горения из ИК-моды в режим “голубого пламени” с дальнейшим отрывом пламени от поверхности матрицы. Верхняя кривая на рис. 2 соответствует полному исчезновению ИК-моды и развитому режиму “голубого пламени” на поверхности матрицы. При $w > 60$ Вт/см² устойчивого горения в ИК-моду не существует, и кривая зависимости $\alpha = \alpha(w)$ разделяет две области — “проскока” и “голубого пламени”. Реально устойчивый оптимальный режим горения, представляющий практический интерес, можно реализовать вдали от границ неустойчивостей в области значений $w < 40$ Вт/см² при $\alpha \sim 1.2$ –1.25. В этом случае температура излучающей поверхности матрицы не превышает ~ 700 –800 °С, что ограничивает возможности горелочного устройства, как эффективного радиационного нагревателя.

Если увеличить удельную мощность горения выше критического значения или использовать смесь оксостехиометрического состава, то происходит перегрев матрицы. Пламя проникает внутрь матрицы и движется навстречу потоку, поскольку из-за возросшей температуры скорость распространения фронта пламени становится выше скорости движения исходной смеси в каналах матрицы. Очевидно, остановить продвижение фронта можно увеличением скорости смеси. Это

воздействие необходимо проводить до тех пор, пока фронт горения не вернется на поверхность матрицы. Если, увеличивая расход смеси, не менять ее состав, то во время стабилизации горения увеличится мощность горения. Если фиксировать мощность горения, то возрастет коэффициент избытка воздуха при увеличении его расхода. При этом заранее не ясно, возможно ли при избыточной мощности или высоком коэффициенте избытка воздуха установить режим стабильного горения.

Опыты проводили с постоянной удельной мощностью горения, т.е. расход природного газа фиксировался, а расход воздуха менялся скачкообразно с различной длительностью и скважностью импульсов, при этом коэффициент α менялся двумя способами. Например, для $w = 60$ Вт/см² в первом случае фиксировалось конечное значение коэффициента $\alpha = 1.37$ (точка *e*), а варьировали его начальное значение $\alpha = 1.05$ – 1.37 (рис. 2, точки *a*, *b*, *c*). Оказалось, что в области регулирования коэффициента избытка воздуха $1.05 < \alpha < 1.2$ реализовывалось стабильное нестационарное горение в ИК-моде. Период импульсов регулирования t_0 менялся от 17 до 22 с при увеличении начального значения α от 1.05 до 1.2. В другом случае фиксировалось начальное значение коэффициента $\alpha = 1.05$ (точка *a*) и варьировали его конечное значение от 1.26 до 1.37 (рис. 2, точки *s*, *d*, *k*, *e*). В этом случае область регулирования оказалась довольно узкой, ограниченной интервалом конечных значений α ($1.3 < \alpha < 1.37$), при этом также реализовывалось стабильное нестационарное горение в ИК-моде. Устойчивое нестационарное горение в ИК-моде могло быть реализовано и при увеличении удельной мощности горения, например, при $w = 70$ Вт/см² (переход между точками *m* и *n*, рис. 2).

На осциллограммах (рис. 3) приведены записи сигналов от времени t с термопар Т1 и Т2, импульсы напряжения U , отражающие времена подачи дополнительного воздуха с периодом t_0 в исходную смесь с варьированием коэффициента α в интервале $1.05 < \alpha < 1.35$, и сигналы J с пирометрического датчика S_2 , пропорциональные величине радиационного потока с поверхности матрицы. Эксперименты показали, что, несмотря на сильное импульсное обеднение смеси, горение было устойчиво, колебания температуры поверхности матрицы T_s и температур T_1 , T_2 , регистрируемых соответственно термопарами Т1 и Т2 внутри матрицы, не превышали 10–15%. По-видимому, здесь сказывался фактор регенерации тепла матрицей. При минимальном расходе воздуха матрица прогревалась, а при увеличении расхода воздуха — охлаждалась. Избыточное тепло матрицы приводило к частичной компенсации потери температуры продуктов сгорания при обеднении смеси.

Оценить величину дополнительной мощности Δw можно как

$$\Delta w = \frac{k C_m m \Delta T_s}{\tau_1},$$

где $C_m = 0.5$ Дж/г · град, $m = 170$ г — удельная теплоемкость и масса матрицы соответственно, k — интегральный коэффициент, учитывающий распределение температуры по длине матрицы, ΔT_s — амплитуда колебаний температуры поверхности матрицы, τ_1 — время охлаждения матрицы в импульсе. Например, для представленного на рис. 3 случая измеренная амплитуда колебаний температуры поверхности матрицы $\Delta T_s \sim 20$ К, $\tau_1 \sim 7$ с. Коэффициент k с учетом данных термопар можно оценить как 0.3–0.4. В этом случае регенеративный эффект при расходе смеси $G \sim 1$ г/с, приводящий к повышению температуры продуктов сгорания на величину ΔT_g , можно оценить как $\Delta T_g = \frac{\Delta w}{C_g G} \sim 60$ –

80 °С. Здесь принята теплоемкость продуктов сгорания $C_g = 1$ Дж/г · К. Отметим, что увеличение коэффициента α с 1.05 до 1.35 при разбавлении смеси воздухом приводило к снижению адиабатической температуры горения на 240 °С. Следовательно, разница температур продуктов сгорания при регулировании составляла ~ 180 °С.

Отключение системы стабилизации горения (в интервале от точки *a* до точки *b* на рис. 3) привело к возникновению тепловой неустойчивости — “проскоку” пламени, о чем свидетельствует повышение температур T_1 и T_2 внутри матрицы, а также радиационного потока J с поверхности матрицы. Включение системы стабилизации горения вернуло систему в первоначальное устойчивое состояние.

Амплитуда колебаний температуры матрицы существенно зависит от периода регулирования t_0 расхода смеси. Изменение температуры ΔT_1 , регистрируемой термопарой Т1, оказывается пропорционально периоду регулирования в интервале $10 < t_0 < 50$ с, при этом температура излучающей поверхности матрицы T_s меняется незначительно (рис. 4). Изменения поверхностной температуры составляли не более 20 °С. Это объясняется стабилизирующим излучением с поверхности матрицы в условиях интенсивного теплопереноса к поверхности матрицы от фронта пламени, расположенного над ней.

Процесс прогрева и остывания матрицы довольно инерционен, что приводит к тепловому гистерезису в процессе регулирования расхода смеси. Гистерезис тепловых колебаний виден на фазовых портретах системы, построенных в координатах T_1 – T_2 и T_g – T_b для случая $w = 60$ Вт/см², $\alpha = 1.05$ – 1.35 , $t_0 = 32.9$ с (рис. 5*a*, *b*). Одна и та же температура нижней части матрицы соответству-

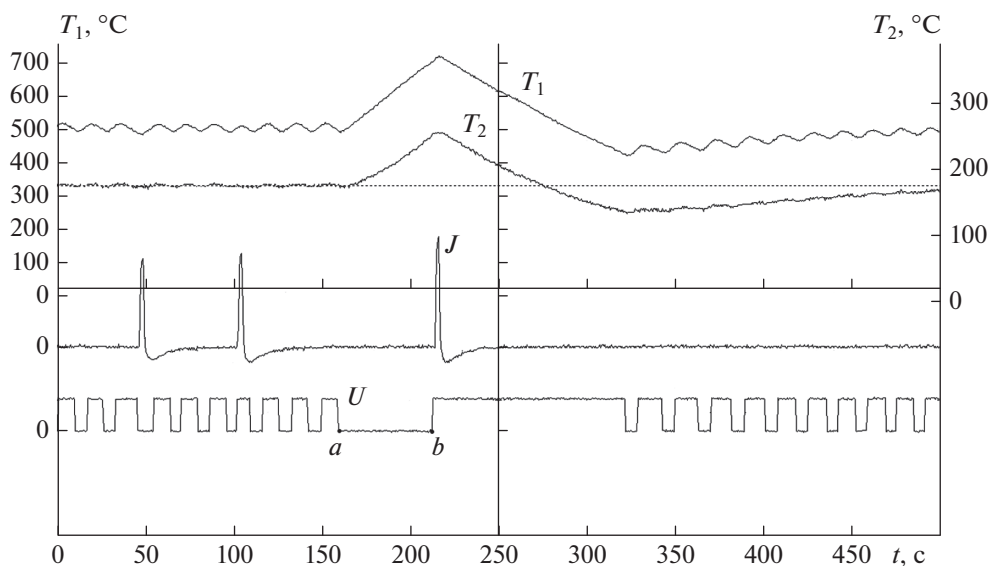


Рис. 3. Осциллограммы сигналов для случая со спиральной матрицей: $w = 60 \text{ Вт/см}^2$, $t_0 = 15.4 \text{ с}$. Масштабы сигналов J и U произвольны.

ет двум значениям температуры верхней части матрицы. Это воспроизводит процесс распространения волн нагрева и охлаждения по телу матрицы при изменении расхода смеси.

В условиях нестационарного горения при глубоком регулировании коэффициента избытка воздуха концентрации вредных компонентов, таких как оксиды азота и монооксид углерода в продуктах сгорания, могут существенно меняться во времени. Замерить их значения без использования регулирования в области тепловой неустойчивости — “проскока” пламени — не представляется возможным. Однако измерение их предельных концентраций в условиях стабильного нестационарного горения при регулировании параметра α не представляет какой-либо сложности. На рис. 6а представлены области режимов горения и регулирования в координатах α – w , на рис. 6б — области изменений концентраций монооксида углерода и оксидов азота в зависимости от w . Стрелками изображены переходы от минимального значения α к максимальному при импульсном изменении расхода воздуха. Из графика рис. 6б следует, что средние значения концентраций, усредненных с учетом скважности регулирующих импульсов, имеют значения, типичные для горелочных устройств инфракрасного излучения [1, 4, 5, 7], однако область удельной мощности горения при стабильной работе данного горелочного устройства существенно расширена.

Матрица из пенометалла

Для сравнения стационарного и нестационарного режимов горелочного устройства инфра-

красного излучения необходимо использовать матрицу, работающую без “проскока” горения в широком диапазоне удельной мощности горения. Выбранная матрица из пенометалла с низкой поверхностной проницаемостью удовлетворяла этим требованиям. Матрица стабильно работала в стационарном режиме в ИК-море до максимальной удельной мощности горения примерно 75 Вт/см^2 (рис. 7а), при этом на границе пе-

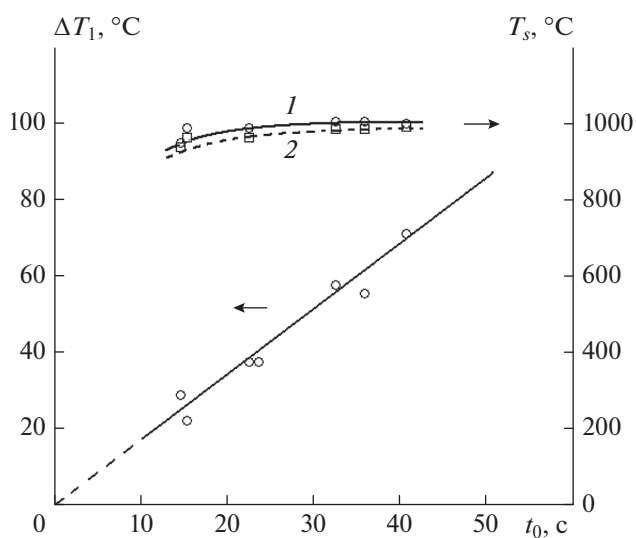


Рис. 4. Колебания температуры внутри матрицы T_1 , а также максимальной (1) и минимальной (2) температур поверхности матрицы, T_s , при стабилизированном горении для $w = 60 \text{ Вт/см}^2$ в зависимости от периода импульсов регулирования t_0 .

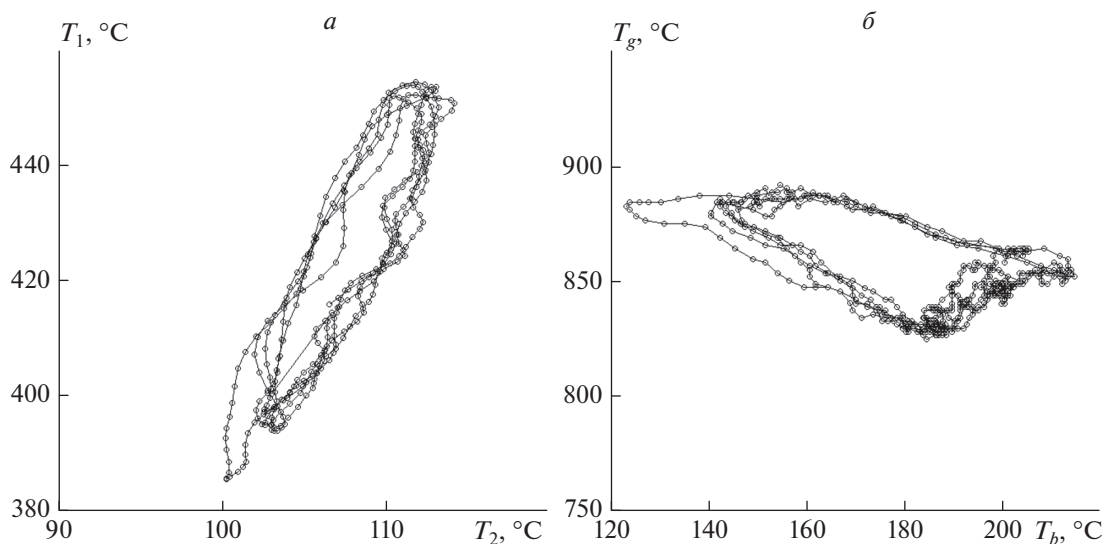


Рис. 5. Фазовые портреты стабилизированного горения: *a* – матрица из гофрированной металлической фольги, *б* – матрица из пенометалла (T_g – температура сетки (радиационного экрана), T_b – температура обратной стороны матрицы).

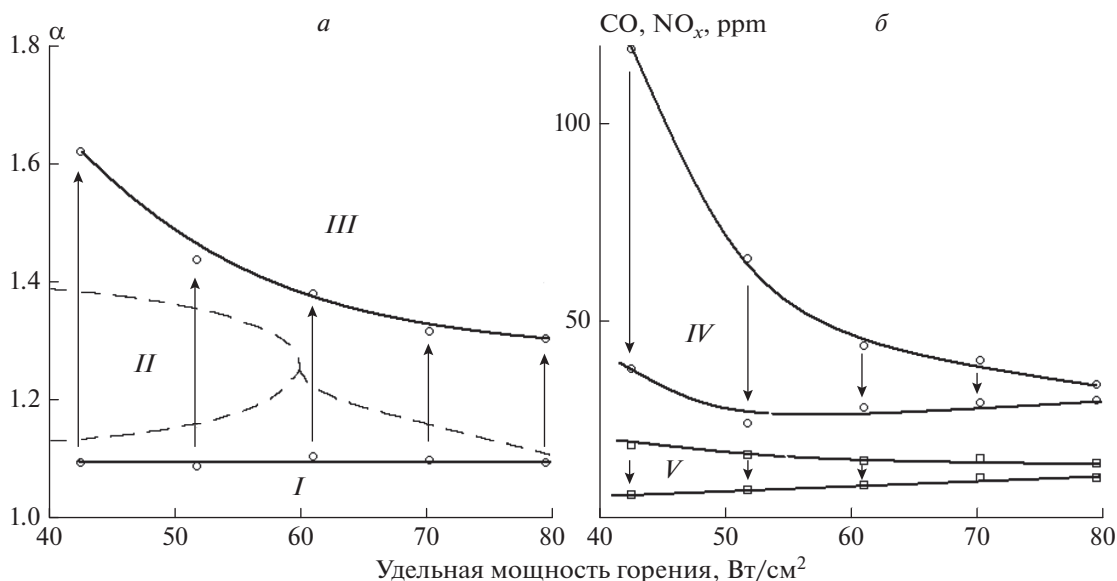


Рис. 6. *a* – Области регулирования параметра α , *б* – изменения концентраций CO и NO_x . *I* – область ИК-моды, *II* – “проскока”, *III* – “голубое пламя”, *IV* – изменения концентрации CO, *V* – изменения концентрации NO_x .

рехода горения из ИК-моды в область “голубого пламени” температура поверхности матрицы была в районе 700°C . Размещение над поверхностью матрицы радиационного сетчатого экрана расширило область ИК-моды до 120 Вт/см^2 . Эффективная температура составного излучателя (поверхность матрицы + сетка), измеренная ИК-пирометром, на границе перехода горения из ИК-моды в область “голубого пламени” почти линейно увеличивалась с ростом параметра w от 800 до 1000°C в интервале $40 < w < 120 \text{ Вт/см}^2$.

Особенностью использования сетки как радиационного экрана является то, что сетка, обтекаемая продуктами горения, имеет температуру, в большей степени зависящую от температуры продуктов сгорания, нежели от температуры матрицы. Радиационный датчик управления S1 регистрирует суммарное излучение как самой матрицы, так и сетки. Поэтому заранее оценить возможность такого управления процессом горения с учетом пониженной чувствительности схемы управления к изменению температуры поверхности мат-

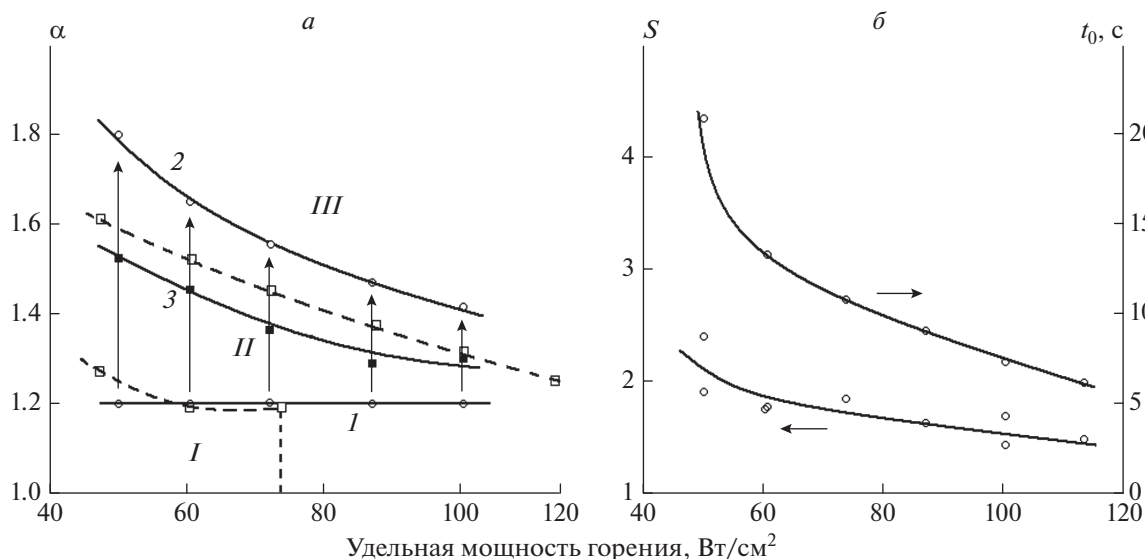


Рис. 7. *a* — Области горения, разделенные штриховыми линиями: *I* — ИК-мода для матрицы без сетки, *II* — ИК-мода для матрицы с сеткой, *III* — “голубое пламя”; *b* — период импульсов управления и их скважность в зависимости от удельной мощности горения.

рицы было проблематично. Однако эксперименты показали, что здесь, как и в случае со спиральной матрицей без сетки, возможно эффективное управление процессом горения. Нестационарный режим горения осуществляли аналогично путем регулирования коэффициента избытка воздуха, при этом минимальное значение α выбиралось в области ИК-моды, а максимальное значение α — в области “голубого пламени”. На графике рис. 7*a* представлены переходы с линии *I*, соответствующей выбранному минимальному значению $\alpha_{\min} = 1.2$, на кривую 2, соответствующую максимальной величине $\alpha_{\max}$. Эта величина, определяемая параметрами электронной схемы управления, зависела от значений удельной мощности горения, при этом с изменением w автоматически изменялся период импульсов управления, t_0 , и их скважность, S : с ростом величины w скважность и период импульсов уменьшались (рис. 7*b*).

Среднее значение α_* (рис. 7*a*, кривая 3), сопоставимое с величиной α при работе горелочного устройства в стационарном режиме, может быть выражено как

$$\alpha_* = \alpha_{\max} S + \alpha_{\min} (1 - S).$$

При варьировании величины удельной мощности горения максимальное значение α автоматически менялось таким образом, что разность $\alpha_{\max} - \alpha_*$ оставалась практически постоянной и равной 0.2 во всем диапазоне изменения параметра w .

При нестационарном горении обнаружен парадоксальный эффект. Температура сетки и радиационный поток излучателя (матрица + сетка)

достигали наибольшей величины при максимальном обеднении смеси воздухом в процессе регулирования. И наоборот, температура сетки и радиационный поток излучателя уменьшались в период минимального коэффициента избытка воздуха. Это видно из осциллограммы (рис. 8), на которой приведены записи температуры сетки, T_g , и обратной стороны матрицы, T_b , а также напряжение управляющих импульсов и сигналы с пирометрического датчика. Эксперимент проводился при $w = 47.5 \text{ Вт/см}^2$, нижний уровень импульсов соответствует горению при $\alpha_{\min} = 1.06$, верхний — при $\alpha_{\max} = 1.61$, период повторения импульсов $t_0 = 24.3 \text{ с}$.

Динамика изменения температуры обратной стороны матрицы и температуры сетки для рассмотренного случая приведена на рис. 9. При увеличении потока воздуха обратная сторона матрицы остывает, при уменьшении потока воздуха — нагревается. Однако процесс нагрева и остывания сетки сдвинут по фазе относительно импульсов расхода воздуха. Фазовый портрет системы, представленный на рис. 5*b*, демонстрирует гистерезис тепловых колебаний в процессе регулирования расхода смеси, связанный с тепловой инерционностью прогрева и остывания матрицы.

Сравнение радиационных потоков и температуры сетки для стационарного и нестационарного горения приведены на рис. 10. Кривые 1 и 2 приведены для случая стационарного горения и соответствуют кривым 1 и 2 на графике рис. 7*a*. При минимальном значении α радиационный поток и температура излучателя максимальны. И наоборот, при максимальном значении α радиацион-

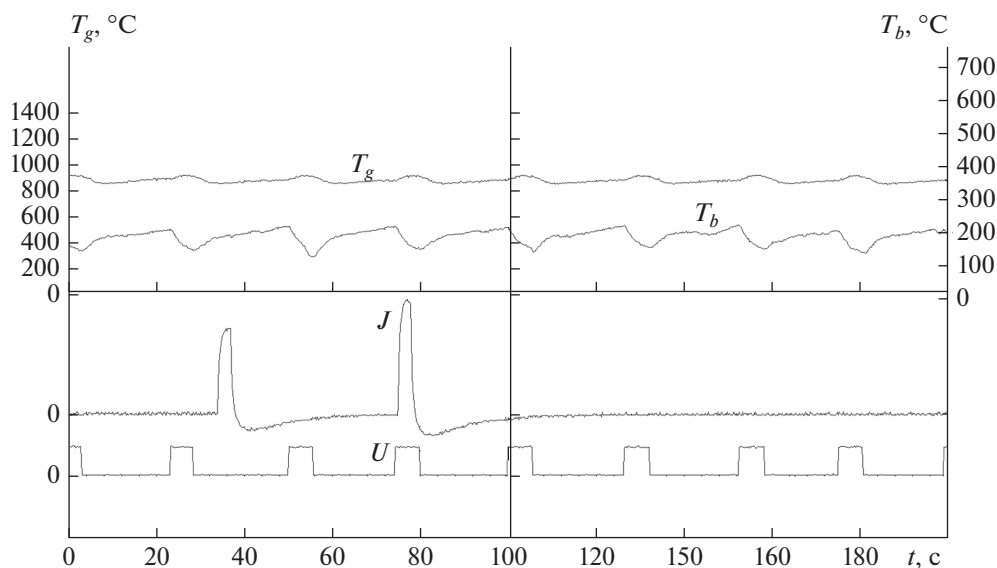


Рис. 8. Осциллограммы сигналов для случая с матрицей из пенометалла; $w = 47.5 \text{ Вт/см}^2$, $t_0 = 24.3 \text{ с}$. Масштабы сигналов J и U произвольны.

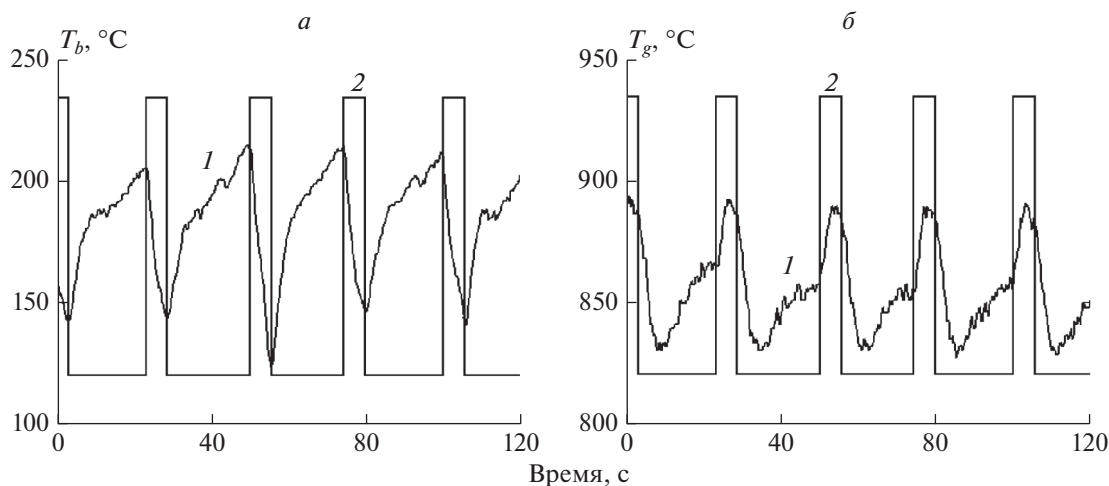


Рис. 9. *а* – Изменение температуры обратной стороны матрицы, *б* – изменение температуры сетки при регулировании: 1 – температура, 2 – импульсы регулирования расхода воздуха.

ный поток и температура излучателя имеют минимальные значения.

В нестационарном случае значения J и T_g заключены внутри области 4. Верхняя граница области соответствует регулируемому горению при $\alpha = \alpha_{\max}(w)$, нижняя граница области соответствует горению при $\alpha = \alpha_{\min}(w)$. Кривая 3 соответствует значениям J и T_g при среднем значении α_* (рис. 7а, кривая 3), сопоставимом с величиной α при работе горелочного устройства в стационарном режиме. При этом эффективная температура излучателя (сетка + матрица) при среднем значении α_* в нестационарном режиме (рис. 10б, кривая 5) была

примерно на 100°C ниже эффективной температуры излучателя при минимальном значении $\alpha_{\min}$.

Из приведенных графиков видно, что при значениях $w < 80 \text{ Вт/см}^2$ средние значения радиационного потока и эффективной температуры излучателя, эквивалентные параметрам при стационарном режиме работы горелочного устройства, лежат в области регулирования. При $w > 80 \text{ Вт/см}^2$ они располагаются выше области регулирования. Это означает, что скважность импульсов регулирования не является оптимальной. Слишком большое время увеличенного расхода воздуха приводит к переохлаждению матрицы. Следовательно, для

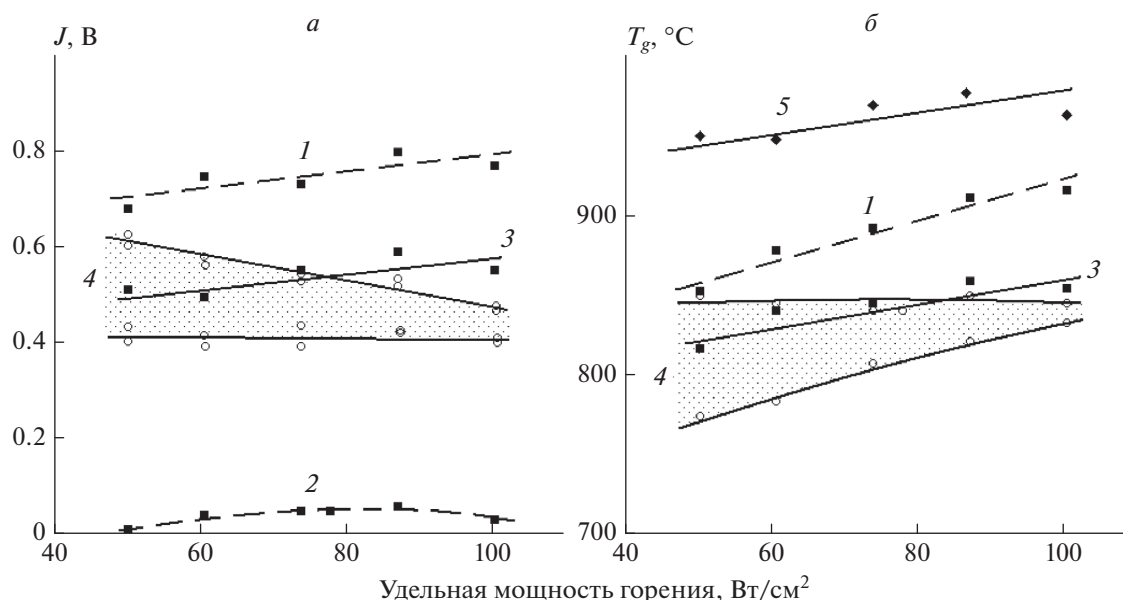


Рис. 10. *а* — Зависимость радиационного потока, *б* — температуры сетки и эффективной температуры излучателя от удельной мощности горения. Штриховые линии — параметры J и T_g при минимальном (1), максимальном (2) и среднем (3) значениях α , 4 — область регулирования, 5 — эффективная температура излучателя при среднем значении α_* .

достижения оптимального режима регулирования с ростом удельной мощности горения необходимо увеличивать скважность импульсов регулирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность стабилизации поверхностного горения в горелочном устройстве инфракрасного излучения путем контроля температуры поверхности матрицы с помощью фотоэлектрического датчика, расположенного вблизи излучающей поверхности матрицы. При изменении расхода воздуха с помощью электронного блока управления по сигналу датчика обеспечивалась практически постоянная температура излучающей поверхности матрицы. Для матрицы из гофрированной металлической фольги реализовано стабильное поверхностное горение смеси природного газа с воздухом в ИК-режиме без “проскока” и отрыва пламени в области параметров, где стабильное горение невозможно. При удельной мощности горения в интервале 60–80 Вт/см² температура излучающей поверхности матрицы оставалась высокой и практически постоянной на уровне ~1000 °С, несмотря на периодическое обеднение смеси от коэффициента избытка воздуха от 1.05 до 1.3–1.35.

Проведено сравнение стационарного и регулируемого нестационарного режимов горения на матрице из пенометалла с сетчатым радиационным экраном. Показано, что при значениях $w < 80$ Вт/см² средние значения радиационного потока и эф-

фективной температуры излучателя, эквивалентные параметрам при стационарном режиме работы горелочного устройства, лежат в области регулирования. При $w > 80$ Вт/см² указанные параметры лежат выше области регулирования, поэтому для достижения оптимального режима нестационарного горения с ростом удельной мощности горения необходимо увеличивать скважность импульсов регулирования. Представляют интерес дальнейшие исследования по стабилизации поверхностного горения путем регулирования суммарного расхода смеси при постоянном коэффициенте избытка воздуха.

Работа выполнена в 2019 г. за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 44.8 “Фундаментальные исследования процессов превращения энергоемких материалов и разработка научных основ управления этими процессами” (№ государственной регистрации АААА-А17-117040610346-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baukal C.E.* Heat transfer industrial combustion. Boca Raton, N.Y.: CRC Press, 2000.
2. *Qiu K., Hayden A.C.S.* // *Appl. Energy*. 2009. V. 86. P. 349.
3. *Muthukumar P., Anand P., Sachdeva P.* // *Intern. J. Energy Environ.* 2011. V. 2. № 2. P. 367.
4. *Viskanta R., Gore J.P.* // *Environ. Combust. Technol.* 2000. V. 1. P. 167.
5. *Brenner G., Pickena'cker K., Pickena'cker O. et al.* // *Combust. and Flame*. 2000. V. 123. P. 201.

6. *Cho K.W., Han K., Lee Y.K. et al.* // *Fuel*. 2001. V. 80. P. 1033.
7. *Шмелев В. М., Николаев В. М.* // *Хим. физика*. 2016. Т. 35. № 3. С. 56.
8. *Shmelev V.* // *Energy and Power Engineering*. 2017. V. 9. P. 366.
9. *Василик Н.Я., Арутюнов В.С., Захаров А.А., Шмелев В.М.* // *Хим. физика*. 2017. Т. 36. № 11. С. 34.
10. *Василик Н.Я., Шмелев В.М.* // *Горение и взрыв*. 2017. Т.10. № 2. С. 4.
11. *Василик Н.Я., Шмелев В.М.* // *Горение и взрыв*. 2019. Т.12. № 1. С. 37.
12. *Кирдяшкин А.И., Орловский В.М., Соснин Э.А. и др.* // *Физика горения и взрыва*. 2010. Т. 46. № 5. С. 37.
13. *Avdic F.* Thesis of Doctor – Engineer. Erlangen: Universität Erlangen–Nürnberg, 2004.
14. *Lee D.R., Ryu J.W., Yang D.B. et al.* Gas radiation burner and controlling method thereof: Patent 7,766,005 B2. US. 2007.