

УДК 536.46

ГОРЕНИЕ БЕДНЫХ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ЩЕЛЕВОЙ ГОРЕЛКЕ С АДИАБАТИЧЕСКИМИ ВНЕШНИМИ СТЕНКАМИ

А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева

Томский государственный университет, 634050 Томск, Moiseeva_KM@t-sk.ru

Решена задача о горении метановоздушной смеси в щелевой горелке с адиабатическими внешними стенками. Задача исследовалась численно в одномерной постановке в размерных переменных. Определена граница существования устойчивого высокотемпературного режима горения метановоздушной смеси в зависимости от скорости подачи газа и содержания метана в смеси. Определен механизм срыва устойчивого горения. Показано влияние теплообмена газа с внутренней вставкой на устойчивость горения.

Ключевые слова: щелевая горелка, метановоздушная смесь, внутренняя вставка, тепловое расширение, устойчивое горение.

DOI 10.15372/FGV20160106

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной промышленности является разработка миниатюрных горелочных устройств и способов эффективного сжигания газовых смесей. Данная задача тесно связана с вопросом устойчивости горения, которая, как известно, определяется совокупным влиянием процессов тепло- и массопереноса [1]. В миниатюрных горелочных устройствах теплоотдача во внешнюю среду через боковую поверхность может существенно влиять на устойчивость горения. Помимо теплопереноса, на реализацию и поддержание устойчивого горения влияет состав реакционной смеси. Пределы горения метановоздушной смеси в обычных условиях находятся в диапазоне объемного содержания метана $5.3 \div 15$ % [2]. Вне этого диапазона устойчивое горение возможно только при изменении условий горения [2].

На устойчивость горения газовой смеси в миниатюрном горелочном устройстве существенное влияние оказывает теплообмен между смесью и элементами конструкции устройства. Можно изменить теплообмен в устройстве и повлиять на устойчивость горения смеси путем введения в конструкцию дополнительных элементов, например таких, как пористый фильтрующий слой [3] или инертная внутрен-

няя вставка [4]. Устойчивость горения можно повысить также за счет дополнительного подогрева газа или всего устройства. В работах [5, 6] показано, что этот процесс можно организовать и поддерживать при подогреве участка стенок узкой трубки или радиального канала. В работе [7] реализовано горение газа в режиме низких скоростей при прогреве стенок узкой трубки от реагирующей реакционной смеси. В работе [8] изучалось горение газа в противоточном теплообменнике. Полагалось, что газы протекают по параллельным каналам в противоположных направлениях и обоюдно влияют друг на друга за счет теплообмена через общую границу каналов. Установлено, что устойчивость режима горения газов определяется составом реакционной смеси и теплообменом между смесью и стенками теплообменника. В [9–11] проведено экспериментальное исследование горения углеводородных смесей в противоточной горелке, состоящей из четырех трубок, показаны области устойчивых режимов горения в зависимости от скорости подачи и содержания горючего компонента в смеси. Для бедных смесей устойчивое горение реализуется в более узком диапазоне скоростей, чем для смесей близкого к стехиометрическому состава.

В работах [12, 13] рассматривалось горение газа в U-образной горелке или загнутом канале. В [12] полагалось, что в одну из трубок U-образной горелки поступает свежая смесь, а через другую вытекают горячие продукты реакции. Химическая реакция возможна только на изогнутом участке, где расположен аналог

Работа выполнена в рамках программы «Научный фонд им. Д. И. Менделеева ТГУ» (проект № 8.1.70.2015).

химического реактора. Подогрев свежей смеси осуществляется за счет теплопередачи от горячих продуктов реакции через внутреннюю стенку горелки. Аналитическое исследование показало, что существуют нижний и верхний пределы массовой скорости подачи смеси, при которых становится невозможно поддержать устойчивое горение. В работе [13] поставлена и решена задача устойчивого горения бедной метановоздушной смеси в U-образной трубке прямоугольного сечения. Трубку перегнули таким образом, что одна из стенок превратилась во внутреннюю, а вторая играла роль внешних стенок. Горение инициировали предварительно разогретой внутренней стенкой. Задача решалась численно. Определены диапазоны безразмерных параметров течения и теплообмена смеси на стенках U-трубки, при которых возможны режимы устойчивого высокотемпературного или колебательного горения. В [5] проведено экспериментальное исследование процесса в случае внешнего электрического нагрева U-образной горелки. Получены области режимов горения в зависимости от средней скорости течения газа и содержания метана в смеси.

Классическая теплодиффузионная модель горения газов не учитывает зависимость коэффициентов диффузии и теплопроводности от температуры. Постоянными предполагаются также плотность и скорость течения газовой смеси. При описании теплообмена с внешними стенками используется допущение постоянства числа Нуссельта. Решение задачи горения при таких условиях позволяет получить качественные закономерности горения. Изменение коэффициента переноса достаточно сильно влияет на результаты, и это важно учитывать в инженерных расчетах. Зависимость коэффициентов переноса и теплового расширения газа от температуры показана в [14] при решении задачи зажигания и определения количества тепла, переданного от горячей стенки газу. Тепловое расширение газа учитывалось в работах [15, 16]. В [15] использовалась физико-математическая модель горения газовой смеси в U-образной трубке [13], учитывающая изменение плотности реакционной смеси при изменении температуры; учет теплового расширения позволил уточнить положение фронта горения и время установления режима горения. В работе [17] показана существенная зависимость теплоотдачи от расхода газа в щелевом тепло-

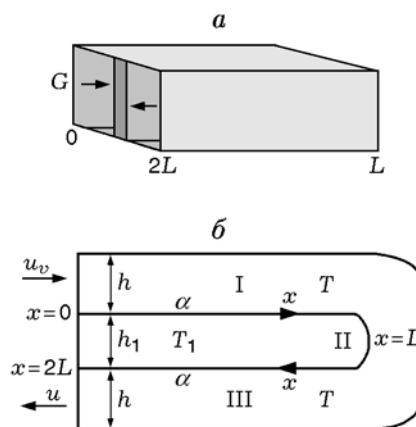


Рис. 1. Модель щелевой горелки (а) и схема движения и теплообмена смеси (б):

I — входная трубка, II — внутренняя вставка, III — выходная трубка

обменнике.

В настоящей работе исследуется горение бедной метановоздушной смеси в щелевой горелке с инертной внутренней вставкой. Внутренняя вставка представляет собой тонкую перегородку, через которую происходит теплообмен между газом, текущим в нижней и верхней частях горелки [13, 15] (рис. 1). Температура вставки изменяется за счет теплообмена с реакционной смесью, оказывая влияние на устойчивость режима горения. Математическая постановка задачи основана на работах [4, 13–15] и учитывает зависимость теплопроводности, диффузии и теплообмена от температуры. Целью исследования является определение условий существования устойчивого высокотемпературного режима горения бедной метановоздушной смеси в зависимости от содержания метана в смеси и скорости подачи газа в горелку.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Холодная метановоздушная смесь с массовым содержанием метана a_v и температурой T_v подается со скоростью u_v в предварительно разогретую щелевую горелку со стороны $x = 0$ (область I на рис. 1, б). Смесь проходит через верхнюю часть горелки и на границе $x = L$ меняет направление движения, на границе $x = 2L$ газ вытекает (область III). Протекая через устройство, реакционная смесь обменивается теплом с внутренней вставкой (область II) по закону Ньютона с коэффициентом

теплообмена α . Предполагается, что внешние стенки горелки теплоизолированы, теплоотдача в окружающую среду через внешнюю боковую поверхность отсутствует.

При постановке задачи приняты следующие допущения: расход реакционной смеси через входное сечение щелевой горелки постоянен; скорость химических реакций определяется законом Аррениуса с первым порядком реакции; учитывается распределение температуры смеси и выгорания горючего компонента только вдоль направления движения смеси; температура в поперечном направлении внутренней вставки считается однородной; давление в горелке постоянно.

С учетом сделанных допущений математическая постановка задачи имеет следующей вид:

уравнение энергии для реакционной смеси:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} + c\rho u\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\alpha}{h}(T_{1,S} - T) + \rho Q a k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad 0 \leq x \leq 2L, \quad (1)$$

$$T_{1,S}(x, t) = \begin{cases} T_1(x, t), & x < L, \\ T_1(2L - x, t), & x \geq L; \end{cases}$$

уравнение энергии для вставки:

$$c_1\rho_1\frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{h_1}(T_1 - T(x, t)) - \frac{\alpha}{h_1}(T_1 - T(2L - x, t)), \quad 0 \leq x \leq L; \quad (2)$$

уравнение баланса массы горючего компонента в смеси:

$$\rho\frac{\partial a}{\partial t} + \rho u\frac{\partial a}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\rho\frac{\partial a}{\partial x}\right) - \rho a k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad 0 \leq x \leq 2L; \quad (3)$$

уравнение состояния идеального газа:

$$p = \frac{\rho}{\mu} RT = \text{const}; \quad (4)$$

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

Начальные условия:

$$T(x, 0) = \begin{cases} T_v, & x \leq \xi, \\ T_v + T_w \frac{x - \xi}{L - \xi}, & \xi < x \leq L, \\ T_v + T_w \frac{2L - x}{L}, & L < x \leq 2L, \end{cases} \quad (6)$$

$$a(x, 0) = \begin{cases} a_v, & x \leq \xi, \\ a_v \frac{L - x}{L - \xi}, & \xi < x \leq L, \\ 0, & L < x \leq 2L, \end{cases}$$

$$T_1(x, 0) = T_{1v} + T_{1w} \frac{x - \xi}{L - \xi}, \quad 0 \leq x \leq L,$$

$$\rho(x, 0) = \frac{p\mu}{RT(x, 0)}, \quad U(x, 0) = U_v.$$

Граничные условия:

$$T(0, t) = T_v, \quad \frac{\partial T(2L, t)}{\partial x} = 0,$$

$$a(0, t) = a_v, \quad \frac{\partial a(2L, t)}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_1(L, t)}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

$$\rho(0, t) = \frac{p\mu}{RT(0, t)}, \quad u(0, t) = u_v.$$

Принятые обозначения: t — время, x — координата в продольном направлении, T — температура, a — массовая концентрация метана в смеси, ρ — плотность, p — давление, c — удельная теплоемкость, u — скорость течения смеси, D — коэффициент диффузии, λ — коэффициент теплопроводности, α — коэффициент теплообмена, R — универсальная газовая постоянная, k_0 — предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса, E — энергия активации, Q — тепловой эффект реакции, h — высота сечения щелевой горелки, μ — молярная масса газа, ξ — граница предварительно разогретой области вставки, L — длина вставки, T_w , T_{1w} — максимальные температуры начального разогрева смеси и внутренней вставки соответственно. Индексами 1, v отмечены параметры внутренней вставки и параметры на входе в горелку.

Начальные условия для задачи горения в общем случае могут вносить неединственность

в решение. Например, в работах [4, 18] для химического реактора с инертной вставкой показана зависимость устанавливающегося режима горения от начальных условий, определены области неединственности этого режима в случае, когда характер устанавливающегося состояния зависит от начальной температуры газа. В работах [13, 15] показана возможность устойчивого горения газовой смеси в U-образном канале при иницировании горения предварительно разогретой внутренней стенкой. В настоящей работе не рассматривается влияние начальных условий на устанавливающиеся режимы горения, так как основной целью было исследование условий поддержания горения. Начальные условия, задаваемые уравнениями (6), означают, что до начала процесса горелка заполнена разогретым газом, плотность которого находят по температуре газа.

Массовая концентрация метана в смеси a связана с объемным его содержанием a_{vol} соотношением

$$a = \frac{a_{vol}\mu_{CH_4}}{(100 - a_{vol})\mu_{air} + a_{vol}\mu_{CH_4}},$$

где μ_{CH_4} — молярная масса метана, μ_{air} — молярная масса воздуха. Коэффициенты диффузии и теплопроводности зависят от температуры следующим образом:

$$\lambda = \lambda_{st} \left(\frac{T}{T_v} \right)^s, \quad D\rho = D_{st}\rho_{st} \left(\frac{T}{T_v} \right)^s \quad [14].$$

Индексом st отмечены параметры при $T = 300$ К.

Коэффициент теплообмена в уравнениях (1), (2) определяется выражением $\alpha = \lambda Nu/h$, где число Нуссельта Nu для течения смеси в узкой щели, образованной двумя параллельными пластинами, определяется согласно [19]:

$$Nu = \begin{cases} 0.979 \left(\frac{hRePr}{x} \right)^{0.33}, & \frac{hRePr}{x} > 1000, \\ 3.78 + (Nu_* - 3.78) \frac{hRePr/x - 100}{900}, & 100 \leq \frac{hRePr}{x} \leq 1000, \\ 3.78, & \frac{hRePr}{x} < 100. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь $Re = \rho u h / \eta$ — критерий Рейнольдса, $Pr = c\eta/\lambda$ — число Прандтля, η — коэффициент динамической вязкости воздуха, Nu_* —

число Нуссельта, соответствующее значению $hRePr/x = 1000$. Локальные значения числа Нуссельта (8) учитывают влияние установления потока смеси во входной части горелки на коэффициент теплообмена между газом и стенкой [19].

Задача (1)–(7) решалась численно по неявной разностной схеме на четырехточечном шаблоне [20]. Уравнение (5) аппроксимировалось неявной разностной схемой с использованием разностей против потока. Разностная сетка задавалась таким образом, чтобы достаточно подробно описать зону прогрева и узкую зону химической реакции, а также обеспечить значение числа Куранта порядка единицы $\left(r = \frac{\lambda_{st}}{c\rho_{st}} \frac{\Delta t}{\Delta h^2} \approx 1 \right)$. Этим требованиям соответствовали шаги по времени и пространству $\Delta t = 10^{-5}$ с, $\Delta h = 10^{-5}$ м. Согласно [1] толщина зоны прогрева перед фронтом пламени определяется выражением $l = \frac{\lambda_{st}}{c\rho_{st} u_n}$, где u_n — скорость распространения пламени. Согласно [2] для 6%-й метановоздушной смеси $u_n = 0.065$ м/с, соответствующая ширина зоны прогрева перед фронтом пламени для $\frac{\lambda_{st}}{c\rho_{st}} \approx 2 \cdot 10^{-5}$ м/с равна $l = 3 \cdot 10^{-4}$ м. При выбранном шаге по пространству в зоне подогрева перед фронтом реакции имеется 30 точек разностной схемы.

Система уравнений (1)–(7) решается в соответствии со следующим алгоритмом вычисления неизвестных на $(n+1)$ -м временном слое. По известным значениям скорости, плотности и температуры смеси на n -м временном слое рассчитываются значения коэффициентов теплообмена, диффузии и теплопроводности α_i , D_i , λ_i . Из уравнения (1) вычисляется температура газа на $(n+1)$ -м временном слое (T_i^{n+1}), из уравнения (4) — плотность газа ρ_i^{n+1} , из уравнения (2) — температура внутренней вставки $T_{1,i}^{n+1}$. Из разностного аналога уравнения (5) при известной плотности на n -м и $(n+1)$ -м временных слоях бегущим счетом определяется скорость движения газовой фазы u_i . Из уравнения (3) рассчитывается концентрация горючего компонента на $(n+1)$ -м временном слое (a_i^{n+1}). Расчеты проводятся до установления стационарного распределения параметров состояния среды в целевой горелке.

На основе описанного алгоритма составлена компьютерная программа и проведено

исследование результатов расчетов на сходимость при уменьшении шага по пространству. Из сходимости полученных результатов выбран шаг по пространству, обеспечивающий сходимость результатов с погрешностью не более 0.3 %. В процессе расчетов контролировалась выполнимость законов сохранения массы и энергии, которая составила 99.5 %.

Контроль за установлением решения задачи горения метановоздушной смеси в щелевой горелке проводился путем контроля выполнения балансных соотношений. Проводился расчет баланса энергии, отданной и принятой инертной вставкой, $\Delta Q = 2L \int_0^L \alpha(T - T_1) dx \approx \sum_i [\Delta h \alpha_i (T_i - T_{1,i})]$. В стационарном режиме горения смеси в щелевой горелке $\Delta Q = 0$, т. е. тепло, полученное инертной внутренней вставкой в зоне горения газа, равно теплу, переданному газу в зоне его подогрева. Контролировался баланс массы на входе и выходе горелки, $\Delta M = \rho_v u_v h - \rho(2L, t) u(2L, t) h$. В стационарном режиме горения в щелевой горелке $\Delta M = 0$. Балансные соотношения выполнялись с точностью $\frac{\Delta M}{\rho_v u_v h} \cdot 100 \% \approx 0.01 \%$, $\frac{\Delta Q}{(Q_{av} + cT_v) \rho_v u_v h} \cdot 100 \% \approx 0.25 \%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты проводились при следующих значениях теплофизических и кинетических параметров: $Q = 55.7$ МДж/кг, $E = 239$ кДж/моль, $c = 1065$ Дж/(кг·К), $\lambda_{st} = 0.025$ Вт/(м·К), $\rho_{st} = 1.179$ кг/м³, $D_{st} = 1.992 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $R = 8.31$ Дж/(моль·К), $p = 0.10132$ МПа, $s = 2/3$, $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\mu = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $\xi = 10^{-2}$ м, $T_v = 300$ К, $T_{1v} = 1000$ К, $T_w = 1700$ К, $T_{w1} = 1400$ К. Характеристики щелевой горелки: размер щели $h = 6 \cdot 10^{-3}$ м, толщина вставки $h_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м, общая протяженность канала $2L = 0.1$ м. Теплофизические параметры материала стенок горелки взяты равными $c_1 = 687$ Дж/(кг·К), $\lambda_1 = 30$ Вт/(м·К), $\rho_1 = 7500$ кг/м³ (термоустойчивая сталь).

По данным [2] экспериментальная скорость пламени 6%-й метановоздушной смеси $u_n = 0.065$ м/с. Согласование указанного значения с результатами по модели (1)–(7) для той самой смеси проводили путем подбора значения k_0 в законе Аррениуса. Совпадение (0.065 м/с) получено при $k_0 = 2.1 \cdot 10^{10}$ с⁻¹.

Расчет скорости распространения пламени по формуле Зельдовича — Франк-Каменецкого [1] при заданных теплофизических и формально-кинетических параметрах 6%-й метановоздушной смеси дал значение $u_n = 0.0676$ м/с. Результаты расчета скорости пламени по модели (1)–(7) удовлетворительно согласуются с экспериментом и расчетом по формуле из работы [1]. Подобранный значение k_0 использовалось во всех дальнейших расчетах процесса горения бедной метановоздушной смеси в щелевой горелке.

В расчетах скорость подачи газа на входе в горелку менялась в диапазоне $u_v = 10^{-3} \div 0.4$ м/с. Объемная концентрация метана в воздухе варьировалась от $a_{vol} = 6$ % до 2 %. Результаты решения задачи при заданных значениях u_v и a_{vol} представлены на рис. 2–4. На рис. 2 показано изменение положения фронта горения x_f во времени при различных скоростях подачи газа u_v и концентрациях метана a_{vol} . Координата фронта горения определялась как значение x , где концентрация метана равна половине концентрации на входе в горелку. Отслеживание фронта горения через величину текущего содержания горючего компонента в смеси связано с тем, что в области существования пламени происходит быстрое выгорание горючего компонента с одновременным повышением температуры газа. И концентрация метана в смеси, равная половине входной концентрации, с малым сдвигом соответствует максимальной температуре на гребне волны горения.

При подаче 6%-й метановоздушной смеси в щелевую горелку со скоростью на входе $u_v = 0.335$ м/с после воспламенения фронт горения вытесняется за пределы горелки, температура вставки уменьшается, горение прекра-

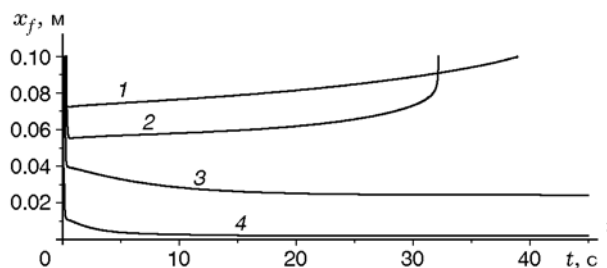


Рис. 2. Зависимость положения фронта горения от времени:

1 — $a_{vol} = 6$ %, $u_v = 0.335$ м/с; 2 — $a_{vol} = 3$ %, $u_v = 0.1$ м/с; 3 — $a_{vol} = 4$ %, $u_v = 0.1$ м/с; 4 — $a_{vol} = 6$ %, $u_v = 0.1$ м/с

щается (кривая 1 на рис. 2). Уменьшение скорости подачи газа на входе в горелку приводит к тому, что положение фронта горения в окрестности входа стабилизируется (кривая 4 на рис. 2). При скорости подачи газа на входе 0.1 м/с фронт горения устанавливается на расстоянии $x = 0.002$ м от входа. Уменьшение объемного содержания метана в смеси до $a_{vol} = 4\%$ приводит к установлению фронта горения на большем расстоянии от входа (кривая 3 на рис. 2) — $x = 0.025$ м.

Для бедных смесей максимальный разогрев ниже, чем для смеси с большим содержанием метана. Внутренняя вставка и газ прогреваются тем сильнее, чем выше содержание метана в смеси. Содержание метана определяет также скорость распространения пламени: она тем выше, чем больше концентрация метана. Координата установления фронта горения определяется разностью между скоростью подачи газа и скоростью распространения пламени. Поэтому чем больше значение a_{vol} , тем ближе к входу в горелку устанавливается фронт. И наоборот, чем меньше объемное содержание метана в смеси, тем дальше от входа устанавливается фронт пламени. Уменьшение содержания метана в смеси до 3% при скорости подачи $u_v = 0.1$ м/с приводит к выносу фронта горения из горелки и прекращению горения (кривая 2 на рис. 2).

На рис. 3 представлены распределения

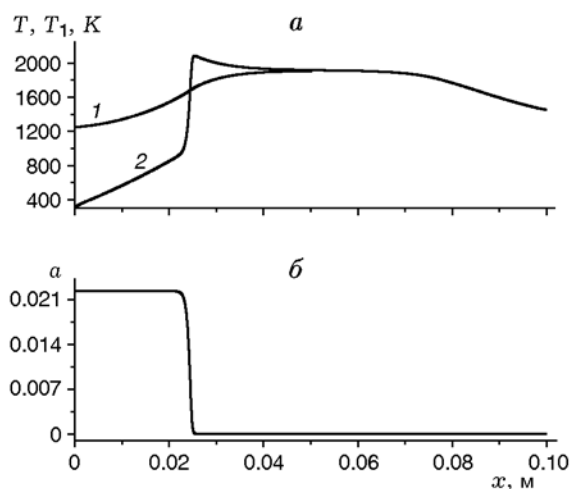


Рис. 3. Установившиеся распределения температуры газа T (а, кривая 2), температуры поверхности внутренней стенки T_1 (а, кривая 1) и массовой концентрации метана a (б) ($a_{vol} = 4\%$, $u_v = 0.1$ м/с)

температуры газа, стенок вставки и массовой концентрации метана по длине проходной части горелки при $u_v = 0.1$ м/с и $a_{vol} = 4\%$ (данные соответствуют кривой 3 на рис. 2). Максимальная температура, достигаемая газовой смесью при заданных параметрах расчета, составила 2082.9 К. На выходе температура продуктов реакции 1453.8 К. Установившаяся температура внутренней вставки изменяется от 1250 К на входе ($x = 0$) до 1903.8 К на повороте потока газа в горелке ($x = L$).

Расчеты показали, что от скорости подачи смеси на входе u_v и объемного содержания метана a_{vol} зависит, будет ли горение метановоздушной смеси в горелке стационарным или нет. Совместное влияние параметров a_{vol} и u_v определяет устойчивость режима горения, координату положения фронта пламени, а также максимальную температуру газа.

На основе проведенных параметрических расчетов в плоскости (u_v, a_{vol}) построена кривая, соответствующая границе существования высокотемпературного стационарного режима горения (рис. 4). Устойчивый высокотемпературный режим горения реализуется в области над кривой. Область под кривой соответствует неэффективному режиму горения, подразделяющемуся на колебательный и устойчивый низкотемпературные режимы, а также на случаи отсутствия зажигания и выноса фронта горения за пределы горелки [4, 13]. В случае, когда скорость подачи газа и объемное содержание метана в смеси удовлетворяют области, находящейся выше кривой на рис. 4, в щелевой го-

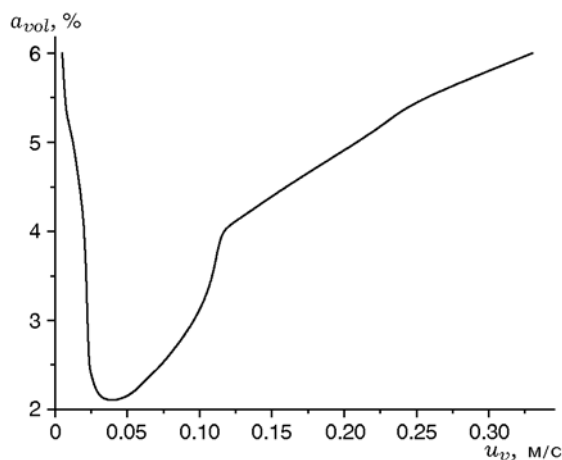


Рис. 4. Граница устойчивого высокотемпературного режима горения метановоздушной смеси

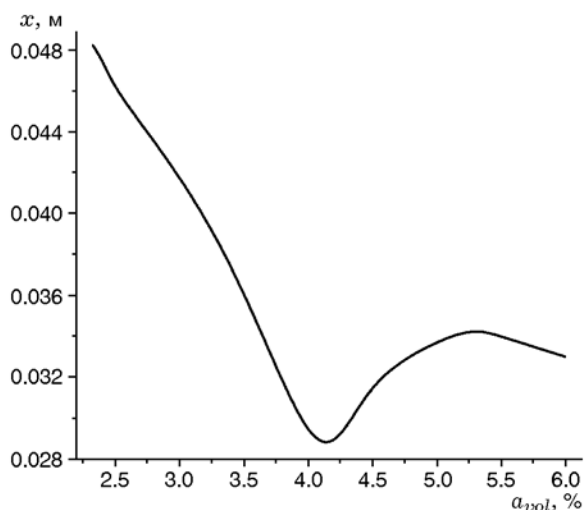


Рис. 5. Глубина максимального продвижения фронта горения в зависимости от состава смеси

релке устанавливается высокотемпературный стационарный режим. При этом пламя способно устанавливаться только в верхней части горелки, $x_f < L$. Зависимость максимальной глубины установления фронта горения от состава смеси представлена на рис. 5.

Согласно рис. 4 нижний предел горения метановоздушной смеси в щелевой горелке с инертной вставкой расширяется по сравнению с пределом горения в обычных условиях. Это связано с влиянием внутренней вставки на устойчивость горения газовой смеси. Внутренняя вставка, как показано в [13], является стабилизатором горения, позволяя воспламенять и поддерживать горение бедных смесей. С одной стороны, вставка служит стоком тепла, через который происходит обмен между верхней и нижней частями устройства. С другой стороны, она выступает как рекуператор тепла. Во входной части горелки внутренняя вставка подогревает входящий газ, а за фронтом горения снимает избыточное тепло.

Из анализа полученных результатов следует, что диапазон значений u_v , в котором возможно устойчивое горение метановоздушной смеси в щелевой горелке, зависит от объемного содержания метана в смеси. При больших скоростях подачи, близких к скорости распространения пламени, фронт горения в начале процесса вытесняется в нижнюю часть горелки. Если скорость подачи меньше критического значения, вытесненный фронт через некоторое время перемещается вверх по потоку, пока не

остановится в верхней части горелки. В случае, когда скорость подачи выше скорости распространения пламени, фронт горения перемещается вниз по потоку в направлении выхода из горелки и через некоторое время пламя затухает.

Существование нижней границы по скорости подачи газа в щелевую горелку (левая ветвь кривой на рис. 4) связано с тем, что при малой скорости подачи метан в смеси не успевает полностью выгореть за время процесса. Скорость распространения пламени выше скорости подачи, поэтому после воспламенения фронт горения перемещается в направлении входа в горелку. За это время за счет теплопроводности температура внутренней вставки выравнивается по сравнению с начальным профилем. Коэффициент теплообмена между газом и внутренней вставкой определяется скоростью потока: он уменьшается при снижении скорости потока, инертная вставка не передает достаточно тепла для поддержания температуры смеси. Одновременно с этим поступающая холодная реакционная смесь понижает температуру в прогретой области газа, и пламя со временем затухает.

Согласно рис. 5 кривая, описывающая максимальное продвижение фронта горения, терпит изгиб в интервалах $a_{vol} = 5.2 \div 5.3\%$ и $4 \div 4.2\%$. Поведение кривой на рис. 5 соответствует перегибам правой ветви кривой на рис. 4. При $a_{vol} = 5.2 \div 5.3\%$ кривая на рис. 4 меняет угол наклона. При $a_{vol} = 4 \div 4.2\%$ резко уменьшается верхнее значение скорости подачи газа u_v , при котором еще возможно установление устойчивого высокотемпературного режима горения (см. рис. 4). При снижении верхнего значения u_v уменьшается максимальная глубина установления фронта. Дальнейшее падение концентрации метана, $a_{vol} < 4\%$, приводит к уменьшению нормальной скорости распространения пламени и, в свою очередь, к смещению фронта горения в глубь горелки. Согласно рис. 5 при малой концентрации метана, $a_{vol} < 4\%$, положение максимальной глубины установления фронта пламени практически линейно зависит от содержания метана в смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное исследование задачи горения метановоздушной смеси в щелевой горелке с внутренней вставкой и адиабатическими внешними стенками. Определена область

существования высокотемпературного стационарного режима горения бедных составов в зависимости от скорости подачи газа и объемного содержания метана в смеси. Определена граница предельного продвижения фронта горения по каналу щелевой горелки в зависимости от состава смеси. Тот факт, что пламя способно устанавливаться только в верхней части U-образной горелки, качественно согласуется с теоретическими предсказаниями из [8] и результатами работ [9–11].

Показано, что при горении метановоздушной смеси в щелевой горелке с инертной внутренней вставкой пределы горения смеси расширяются. Сдвиг нижнего предела горения в сторону меньших концентраций метана связан со стабилизирующей ролью инертной вставки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
2. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.
3. Какуткина Н. А., Коржавин А. А., Манжос Е. В., Рычков А. Д., Вьюн А. В. Иницирование горения газа в пористой среде внешним источником // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2013. — № 2(5). — С. 189–196.
4. Буркина Р. С., Моисеева К. М. Моделирование процессов теплообмена и химического реагирования горючей смеси в проточном реакторе // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 5. — С. 3–12.
5. Марута К., Парк Дж. К., Ох К. С., Фуджимори Т., Минаев С. С., Фурсенко Р. В. Особенности горения газа в узком нагретом канале // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 21–29.
6. Минаев С. С., Серещенко Е. В., Фурсенко Р. В., Фан А., Марута К. Разделяющиеся пламена в узком канале с градиентом температуры в стенках // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 2. — С. 12–19.
7. Замашиков В. В. О горении газа в узкой трубке // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 2. — С. 22–26.
8. Фурсенко Р. В., Минаев С. С. Устойчивость пламени в системе с противоточным теплообменом // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 2. — С. 17–25.
9. Belmont L. E., Solomon S. M., Ellzey J. L. Syngas production from heptane in a non-catalytic counter-flow reactor // Combust. Flame. — 2012 — V. 159, N 12. — P. 3624–3631.
10. Belmont L. E., Schoegl I., Ellzey J. L. Experimental and analytical investigation of lean premixed methane/air combustion in a mesoscale counter-flow reactor // Proc. Combust. Inst. — 2013. — V. 34, N 2. — P. 3361–3367.
11. Belmont L. E., Ellzey J. L. Lean heptane and propane combustion in a non-catalytic parallel-plate counter-flow reactor // Combust. Flame. — 2014. — V. 161, N 4. — P. 1055–1062.
12. Ronney P. D. Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors // Combust. Flame. — 2003. — V. 135, N 4. — P. 421–439.
13. Крайнов А. Ю., Моисеева К. М. Режимы горения бедной метановоздушной смеси в U-образной горелке // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. — 2014. — № 2(28). — С. 69–76.
14. Шкадинский К. Г., Барзыкин В. В. Закономерности зажигания газов накаленной поверхностью с учетом диффузии и гидродинамики // Физика горения и взрыва. — 1968. — Т. 4, № 2. — С. 176–181.
15. Крайнов А. Ю., Моисеева К. М. Колебательные режимы горения бедной метановоздушной смеси в U-образной горелке // XXXI Сиб. теплофиз. семинар, посвященный 100-летию со дня рождения акад. С. С. Кутателадзе: докл. — Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2014. — С. 207–210.
16. Дементьев А. А., Крайнов А. Ю. К вопросу о распространении ламинарного пламени в газе с инертной пылью // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 70–75.
17. Кузнецов В. В., Витовский О. В., Димов С. В., Козлов С. П. Теплообмен при химических превращениях в щелевых и микроканальных реакторах // Тр. 4-й Рос. нац. конф. по теплообмену. — 2006. — Т. 3. — С. 266–269.
18. Буркина Р. С., Моисеева К. М. Горение в реакторе идеального смешения с инертной внутренней насадкой // Хим. физика. — 2014. — Т. 33, № 5. — С. 47–53.
19. Справочник по теплообменникам: в 2 т. / пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1.
20. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971.

*Поступила в редакцию 21/1 2015 г.,
в окончательном варианте — 18/III 2015 г.*