

А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ГАЗА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЩЕЛЕВОЙ ГОРЕЛКЕ С ВНУТРЕННЕЙ ВСТАВКОЙ<sup>1</sup>

Сформулирована математическая постановка задачи горения газовой смеси в щелевой горелке с инертной внутренней вставкой, учитывающая зависимость коэффициентов диффузии, теплообмена и теплопроводности от температуры. Проведено численное исследование горения 6 %-й метано-воздушной смеси. Показано, что скорость подачи газа на входе в щелевую горелку определяет устойчивость режима горения.

**Ключевые слова:** метано-воздушная смесь, щелевая горелка, тепловое расширение, устойчивость горения газов.

Задача горения газовой смеси в микрогорелке представляет собой одно из перспективных направлений в современных исследованиях. Актуальность задачи связана с тенденцией в промышленности к миниатюризации горелочных устройств и топливных элементов. Как известно, основным требованием, предъявляемым к горелочным устройствам, является энергоэффективность и устойчивость режимов работы горелки. При горении газа в микрогорелке, в роли которой может выступать узкая трубка или канал, потери тепла через боковую поверхность горелки могут привести к неустойчивости горения и затуханию пламени.

Для сокращения тепловых потерь и поддержания горения в узкой трубке или радиальном канале в [1, 2] предложено использовать дополнительный подогрев стенок трубки или канала. В [3] предложена модель горения газов в противоточном теплообменнике. Газы, перемещаясь вдоль параллельных трубок в противоположных направлениях, обмениваются теплом через общую границу трубок, тем самым поддерживая горение. Авторами [4, 5] показано, что можно организовать и поддержать горение метано-воздушной смеси в узкой U-образной трубке прямоугольного сечения за счет зажигания смеси предварительно разогретой внутренней стенкой трубки. Реакционная смесь дополнительно подогревается за счет теплообмена газа в верхней и нижней частях трубки через тонкую внутреннюю стенку, что позволяет поддержать горение бедной смеси [4, 5]. Устойчивость горения газовой смеси определяется не только величиной тепловых потерь, но и совокупным влиянием параметров скорости потока и теплообмена [6]. В [4, 5] проведен анализ совокупного влияния процессов тепло-массопереноса в горелке и определены диапазоны значений скорости и теплообмена смеси на внешних стенках U-трубки, при которых устанавливается высокотемпературный или колебательный режим горения.

Классическая тепло-диффузионная модель горения газов предполагает постоянство плотности и скорости течения газовой смеси и не учитывает зависимость

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1943).

коэффициентов диффузии и теплопроводности от температуры. При описании теплообмена с внешними стенками используют допущение постоянства числа Нуссельта. Расчеты для таких допущений позволяют получить качественные закономерности процесса. Учет изменения коэффициентов переноса оказывает достаточно сильное влияние на результаты и важно для инженерных расчетов. Влияние температурной зависимости коэффициентов переноса и теплового расширения газа было показано в [7] при решении задачи зажигания и определения количества тепла, переданного от горячей стенки газу. Влияние теплового расширения газа показано в работах [5, 7, 8].

В настоящей работе, на основе физико-математической модели горения газа, [4, 5], поставлена и решена задача горения 6 %-й метано-воздушной смеси в щелевой горелке с инертной внутренней вставкой, (рис. 1). Математическая постановка задачи формулируется в размерном виде и учитывает влияние теплового расширения газа и зависимость коэффициентов диффузии, теплопроводности и теплообмена от температуры. Основной целью исследования является определение условий существования высокотемпературного режима горения.

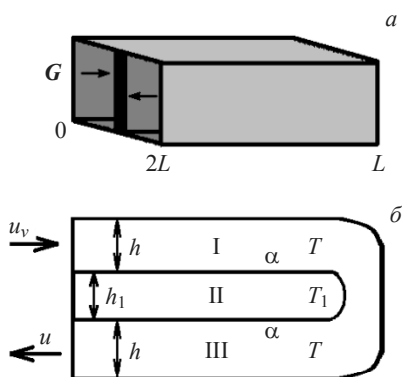


Рис. 1. Модель щелевой горелки (а);  
схема горелочного устройства (б):  
I – входная трубка, II – внутреннее  
тело, III – выходная трубка

Холодная метано-воздушная смесь со скоростью  $u_v$ , массовым содержанием метана  $a_v$  и температурой  $T_v$  подается 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, рис. 1, б). Протекая через устройство, реакционная смесь обменивается теплом с внутренней вставкой по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена  $\alpha$ . Предполагается, что теплоотдача в окружающую среду через внешнюю боковую поверхность отсутствует.

При постановке задачи приняты следующие допущения: расход реакционной смеси через входное сечение щелевой горелки постоянен,  $G = \rho u = \text{const}$ ; экзотермические химические реакции определяются законом Аррениуса с первым порядком реакции; учитывается распределение температуры смеси и выгорания горю-

чей компоненты 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 следующий вид:

уравнение энергии для реакционной смеси:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} + c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\alpha}{h} (T_{1,s} - T) + \rho Q a k_0 \exp \left( -\frac{E}{RT} \right),$$

$$0 \leq x \leq 2L, \quad T_{1,s}(x, t) = \begin{cases} T_1(x, t), & x < L, \\ T_1(2L - x, t), & x \geq L; \end{cases} \quad (1)$$

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 горючей компоненты 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:

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

Граничные условия:

$$T(0, t) = T_v, \quad a(0, t) = a_v, \quad \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} = 0, \quad \rho(0, t) = \frac{p \mu}{RT(0, t)}, \quad u(0, t) = u_v, \quad (6)$$

$$\frac{\partial a(2L, t)}{\partial x} = \frac{\partial T(2L, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_1(L, t)}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Начальные условия:

$$T(x, 0) = \begin{cases} T_v, & x \leq \xi, \\ T_v + T_w \frac{x - \xi}{L - \xi}, & \xi < x \leq L, \\ T_v + T_w \frac{2L - x}{L}, & L < x \leq 2L, \end{cases} \quad a(x, 0) = \begin{cases} a_v, & x \leq \xi, \\ a_v \frac{L - x}{L - \xi}, & \xi < x \leq L, \\ 0, & L < x \leq 2L, \end{cases} \quad (8)$$

$$T_1(x, 0) = T_{1v} + T_{1w} \frac{x - \xi}{L - \xi}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad \rho(x, 0) = \frac{p \mu}{RT(x, 0)}, \quad U(x, 0) = U_v.$$

Принятые обозначения:  $t$  – время;  $x$  – координата в продольном направлении;  $T$  – температура;  $a$  – массовая концентрация метана в смеси;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $c$  – удельная теплоемкость;  $u$  – скорость течения смеси;  $D$  – коэффициент диффузии;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $E$  – энергия активации;  $Q$  – тепловой

эффект реакции;  $h$  – высота проходного сечения щелевой горелки;  $h_1$  – толщина внутренней вставки;  $\mu$  – молярная масса газа;  $\xi$  – 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, определяемые уравнениями (8), соответствуют тому, что до начала процесса горелка заполнена разогретым газом, плотность которого определяется по температуре газа.

Переменная  $a$  определяет значение массовой концентрации метана в смеси. Зависимость коэффициентов диффузии и теплопроводности от температуры определяются следующими выражениями [7]:

$$\lambda = \lambda_v \left( \frac{T}{T_v} \right)^s, \quad Dp = D_v p_v \left( \frac{T}{T_v} \right)^s.$$

Коэффициент теплообмена в уравнениях (1), (2) определяется из выражения  $\alpha = \frac{\lambda Nu}{h}$ , где  $Nu$  – число Нуссельта. Число Нуссельта определяется согласно [9] для случая течения смеси в узкой щели, образованной двумя параллельными пластинами:

$$Nu = \begin{cases} 0,979 \left( \frac{h Re Pr}{x} \right)^{0,33}, & \frac{h Re Pr}{x} > 1000, \\ 3,78 + (Nu_* - 3,78) \frac{h Re Pr/x - 100}{900}, & 100 \leq \frac{h Re Pr}{x} \leq 1000, \\ 3,78, & \frac{h Re Pr}{x} < 100. \end{cases} \quad (9)$$

В (9)  $Re$  – число Рейнольдса,  $Re = \frac{\rho u h}{\eta}$ ;  $Pr$  – число Прандтля;  $Pr = \frac{c \eta}{\lambda}$ ;  $s$  – степень в зависимости коэффициентов диффузии и теплопроводности от температуры;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости воздуха,  $Nu_*$  – значение числа Нуссельта, соответствующее значению  $\frac{h Re Pr}{x} = 1000$ . Локальные значения чис-

ла Нуссельта определяются выражениями (9), которые учитывают влияние установления скорости потока во входной части горелки на коэффициент теплообмена между газом и стенкой [9].

Задача (1) – (8) решалась численно по неявной разностной схеме на четырехточечном шаблоне [10]. Уравнение (5) аппроксимировалось по неявной разностной схеме с конечными разностями против потока. Уравнения (1) – (3) рассчитывались методом прогонки. Из уравнения (4) определялось значение плотности смеси на новом  $(n+1)$ -м временном слое. Из уравнения (5), аналогично [8], бегущим счетом из известных значений плотности смеси на текущем  $n$ -м и новом  $(n+1)$ -м временных слоях рассчитывалось значение скорости на  $(n+1)$ -м слое. Задача рассчитывалась до установления. Контроль за установлением проводился через контроль баланса энергии и баланса массы.

Для расчета были выбраны следующие значения параметров:

$$Q = 55,7 \text{ МДж/кг}, E = 239 \text{ кДж/моль} [6], k_0 = 2,1 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}, R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)},$$

$$c = 1065 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \lambda_v = 0,025 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \rho_v = 1,179 \text{ кг/м}^3, s = 2/3,$$

$$D_v = 1,992 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, p = 0,10132 \text{ МПа}, \eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, \mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль},$$

$$\xi = 10^{-2} \text{ м}, T_v = 300 \text{ К}, T_{1v} = 1000 \text{ К}, T_w = 1700 \text{ К}, T_{w1} = 1400 \text{ К}.$$

Массовое содержание метана на входе в горелку равнялось  $a_v = 0,035$ . Это значение соответствует объемному содержанию метана  $a_{\text{vol}} = 6\%$ . Характеристики щелевой горелки: размер щели  $h = 6$  мм, толщина вставки  $h_1 = 0,2$  мм, общая протяженность канала  $2L = 100$  мм. Теплофизические параметры материала стенок горелки были взяты равными  $c_1 = 687 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \lambda_1 = 30 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \rho_1 = 7500 \text{ кг/м}^3$  (термоустойчивая сталь).

Расчеты показали, что для заданных теплофизических и формально-кинетических параметров скорость распространения пламени 6 %-й метано-воздушной смеси при отсутствии тепловых потерь совпадает со скоростью, определенной экспериментально [11],  $u_n = 0,065 \text{ м/с}$  и дает удовлетворительное согласие со скоростью, рассчитанной по формуле Зельдовича – Франк-Каменецкого [6],  $u_n = 0,0676 \text{ м/с}$ .

Согласно результатам расчетов, высокотемпературный режим горения возможен для диапазона значений скорости подачи газа  $0,005 \leq u_v \leq 0,33 \text{ м/с}$ . Ниже указанного диапазона реализуется неэффективный режим горения с неполным выгоранием горючей компоненты. При значениях скорости подачи, превышающих  $0,33 \text{ м/с}$ , фронт горения выносится за пределы щелевой горелки.

Результаты расчета задачи представлены на рис. 2 – 4. На рис. 2 представлено положение координаты фронта горения,  $x_f$ , во времени. За координату фронта горения выбиралась пространственная координата  $x$ , в которой содержание метана

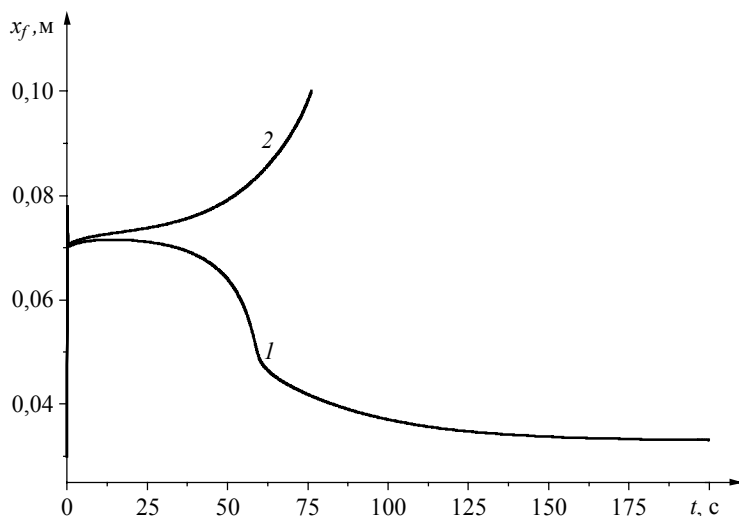


Рис. 2. Зависимость координаты положения фронта пламени от времени:  
кр. 1 –  $u_v = 0,33 \text{ м/с}$ ; кр. 2 –  $u_v = 0,331 \text{ м/с}$

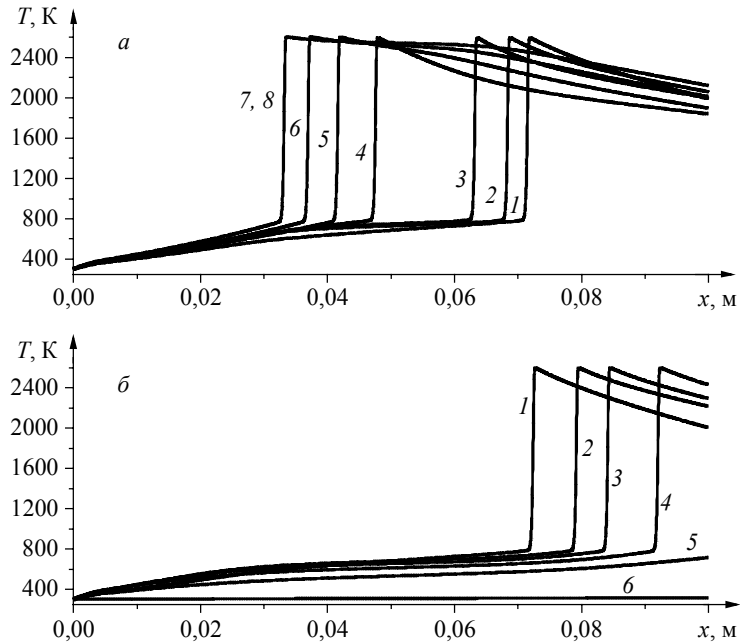


Рис. 3. Распределения температуры смеси в различные моменты времени:  $a - u_v = 0,33$  м/с; кр. 1 –  $t = 10$  с, кр. 2 –  $t = 40$  с, кр. 3 –  $t = 50$  с, кр. 4 –  $t = 60$  с, кр. 5 –  $t = 75$  с, кр. 6 –  $t = 100$  с, кр. 7 –  $t = 200$  с, 8 –  $t = 250$  с;  $\bar{b} - 0,331$  м/с, кр. 1 –  $t = 10$  с, кр. 2 –  $t = 50$  с, кр. 3 –  $t = 60$  с, кр. 4 –  $t = 70$  с, кр. 5 –  $t = 80$  с, кр. 6 –  $t = 200$  с

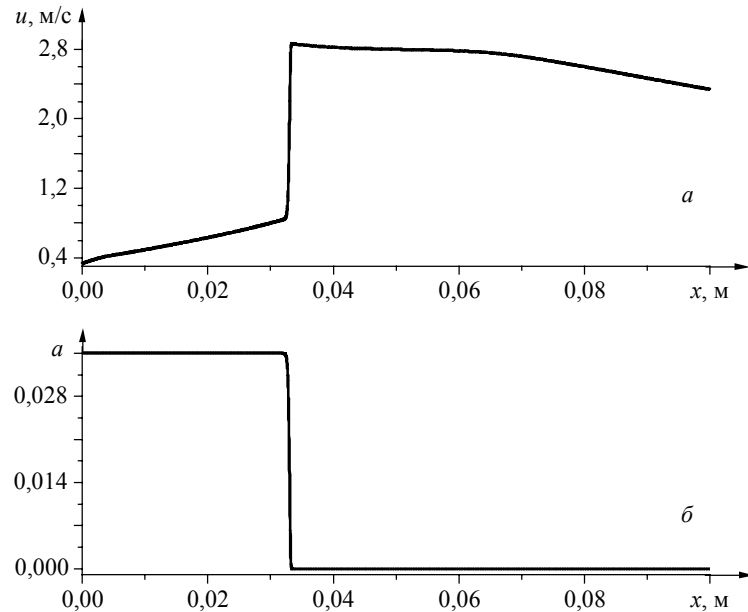


Рис. 4. Установившиеся распределения скорости течения смеси (а), концентрации метана (б),  $u_v = 0,33$  м/с

равнялось половине от входного значения  $u_v$ . Кривая 1, рис. 2, рассчитана для  $u_v = 0,33$  м/с и соответствует устойчивому высокотемпературному режиму горения. Повышение скорости подачи на входе до  $u_v = 0,331$  м/с приводит к выносу фронта горения за пределы щелевой горелки и затуханию пламени (кривая 2, рис. 2).

На рис. 3 представлены распределения температуры смеси в фиксированные моменты времени для случаев установления высокотемпературного режима горения (рис. 3, а) и срыва горения (рис. 3, б). Рис. 3, а соответствует кривой 1 рис. 2. Рис. 3, б соответствует кривой 2 рис. 2. Установившиеся распределения скорости реакционной смеси и концентрации горючей компоненты, соответствующие кривой 1 рис. 2 и рис. 3, а, представлены на рис. 4.

Из анализа результатов расчета следует, что малое изменение скорости подачи смеси на входе в горелку от 0,33 м/с до 0,331 м/с приводит к срыву устойчивого горения. Для скорости подачи  $u_v = 0,33$  м/с после зажигания фронт горения «выскакивает» в нижнюю часть щелевой горелки, затем медленно перемещается в направлении поворота, переходит в верхнюю часть трубки и устанавливается на глубине 0,033 м. Продвижение волны горения вдоль оси горелки в случае  $u_v = 0,33$  м/с показано на рис. 3, а. При повышении скорости подачи до 0,331 м/с фронт горения после зажигания продвигается в сторону выхода из горелки, до полного вытеснения пламени. Продвижение волны горения для  $u_v = 0,331$  м/с показано на рис. 3, б.

### Выводы

Проведено численное исследование задачи горения 6 %-й метано-воздушной смеси в щелевой горелке с инертной вставкой при учете зависимости коэффициентов диффузии и теплопроводности от температуры. Определен диапазон значений скорости подачи газа, при котором в горелке устанавливается высокотемпературный режим горения. Показан переход от высокотемпературного режима к срыву пламени при малом изменении скорости подачи газа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Марута К., Минаев С.С., Парк Дж.К., Ох К.С., Фуджимори Т., Фурсенко Р.В. Особенности горения газа в узком нагретом канале // Физика горения и взрыва. 2004. № 5 (40). С. 21–29.
2. Минаев С.С., Серещенко Е.Р., Фурсенко Р.В., Фан А., Марута К. Разделяющиеся пламена в узком канале с градиентом температуры в стенках // Физика горения и взрыва. 2009. № 2 (45). С. 12–19.
3. Фурсенко Р.В., Минаев С.С. Устойчивость пламени в системе с противоточным теплообменом // Физика горения и взрыва. 2005. № 2 (41). С. 17–25.
4. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Режимы горения бедной метано-воздушной смеси в U-образной горелке // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2014. № 2(28). С. 69–76.
5. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Колебательные режимы горения бедной метано-воздушной смеси в U-образной горелке // XXXI Сибирский теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе: доклады. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2014. С. 207–210.
6. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
7. Шкадинский К.Г., Барзыкин В.В. Закономерности зажигания газов накаленной поверхностью с учетом диффузии и гидродинамики // Физика горения и взрыва. 1968. № 2 (4). С. 176–181.

8. Дементьев А.А., Крайнов А.Ю. К вопросу о распространении ламинарного пламени в газе с инертной пылью // Физика горения и взрыва. 2011. № 4 (47). С. 70–75.
9. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1: пер. с англ. / под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
10. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971.
11. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах: пер. с англ. под ред. К.И. Щелкина, А.А. Борисова. М.: Мир, 1968.

Статья поступила 20.01.2015 г.

Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. THE INFLUENCE OF GAS FLOW RATE ON THE METHANE-AIR MIXTURE BURNING IN A FLAT BURNER WITH AN INERT BODY  
DOI 10.17223/19988621/33/6

A mathematical model of the methane-air mixture combustion in a flat burner with an inert body is presented. Gases in the top and lower parts of the flat burner exchange heat through the inert body. The inert body serves as a regulator of the combustion. The mathematical model takes into account gas thermal expansion and the dependence of diffusion, heat conductivity, and heat exchange coefficients on temperature. The numerical solution was carried out in dimension variables and parameters.

It is shown that the combustion front is established in the top part of the flat burner. The range of the 6% methane-air flow velocity for which the steady combustion mode is implemented is determined. The dynamics of establishing the stationary combustion mode and flame failure is presented. It is shown that the inert body provides a heat recovery, warming up of the mixtures in the entrance part of the burner, and the mixture ignition.

Keywords: methane-air mixture, flat burner, heat expansion, steady gas mixture combustion.

KRAINOV Alexey Yurievich (Doctor of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.,  
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)  
E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

MOISEEVA Ksenia Mihailovna (M. Sc., Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)  
E-mail: Moiseeva\_KM@t-sk.ru

#### REFERENCES

1. Maruta K., Parc J.K., Oh K.C., Fujimori T., Minaev S.S., Fursenko R.V. Characteristics of microscale combustion in a narrow heated channel. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2004, no. 40, pp. 516–523.
2. Minaev S.S., Sereshchenko E.V., Fursenko R.V., Fan A., Maruta K. Splitting flames in a narrow channel with a temperature gradient in the walls. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, no. 2 (45), pp. 119–125.
3. Fursenko R.V., Minaev S.S. Flame stability in a system with counterflow heat exchange. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2005, no. 2 (41), pp. 133–139.
4. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. Rezhimy gorenija bednoy metano-vozdushnoy smesi v U-obraznoy gorelke. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2014, no. 2(28), pp. 69–76. (in Russian)
5. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. Kolebatel'nye rezhimy gorenija bednoy metano-vozdushnoy smesi v U-obraznoy gorelke. *XXXI Sibirskiy teplofizicheskij seminar, posvyashchennyy 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika S.S. Kutateladze: doklady*. Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN Publ., 2014, pp. 207–210. (in Russian)
6. Zel'dovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya gorenija i vzryva*. Moscow, Nauka Publ., 1980. (in Russian)
7. Shkadinskii K.G., Barzykin V.V. Hot-surface ignition of gases with allowance for diffusion and hydrodynamics. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1968, no. 2 (4), pp. 100–104.

8. Dement'ev A., Krainov A.Yu. On the problem of laminar flame propagation in a gas with an inert dust. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2011, no. 4 (47), pp. 436–441.
9. Petukhov B.S., Shikov V.K. (eds.). *Spravochnik po teploobmennikam*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, vol. 1. 561 p. (in Russian)
10. Samarskiy A.A. *Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem*. Moscow, Nauka Publ., 1971. (in Russian)
11. L'yuis B., El'be G. *Gorenie, plamya i vzryvy v gazakh*. Moscow, Mir Publ., 1968. (in Russian)