

УДК 536.46

А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева

**РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ БЕДНОЙ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ
В U-ОБРАЗНОЙ ГОРЕЛКЕ¹**

Проведено численное исследование горения бедной метано-воздушной смеси в U-образной трубке в случае инициирования процесса горения предварительно разогретой внутренней стенкой трубки. Показано, что в зависимости от безразмерного параметра интенсивности теплообмена реакционной смеси на внешней стенке трубки и безразмерного параметра течения смеси в системе может реализоваться высокотемпературное или низкотемпературное стационарное состояние, либо колебательный режим горения.

Ключевые слова: бедная метано-воздушная смесь, процессы тепло-массопереноса, зажигание внутренней стенкой, устойчивые и неустойчивые режимы работы горелочного устройства.

Задача по сжиганию бедных газовых смесей является актуальной по нескольким причинам. Во-первых, существует проблема сокращения выбросов в атмосферу вредных газов и продуктов недогорания. Во-вторых, привлекает внимание задача полезной утилизации низкокалорийных топлив. Зажечь бедную метано-воздушную смесь трудно, так как на концентрационном пределе горение становится неустойчивым, а ниже этого предела – невозможным. В настоящее время продолжают разработки методов, позволяющих стабилизировать процесс горения бедных смесей [1]. Например, в [1] предлагается метод беспламенного горения или горения в пористых матрицах.

На устойчивость и эффективность работы горелочного устройства существенное влияние оказывает его конструкция [2]. Меняя форму горелочного устройства или добавляя в конструкцию различные теплообменные системы, можно изменить характер протекания процесса горения. Авторы [3] предлагают сжигать низкокалорийные топлива в реакторе с пористым фильтрационным слоем. Введение пористого слоя обеспечивает сжигание низкокалорийного топлива и дает возможность управлять процессом горения через изменение характеристик пористого слоя. В работе [4] была предложена модель проточного реактора с инертным внутренним телом. Присутствие инертного тела внутри горелочного устройства приводит к изменению процесса теплообмена внутри реактора и позволяет повлиять на режимы его работы.

Теплообмен реакционной смеси с боковой поверхностью может приводить к затуханию пламени или, наоборот, способствовать стабилизации процесса горения для критических условий существования пламени. В работах [5–7] рассматривалось горение газа в узких трубках с диаметром меньше критического. В таких каналах теплотери через боковую поверхность могут привести к затуханию пламени. В [5] предлагалось подогревать стенки канала на одном из участков. Неравномерный нагрев стенок позволяет стабилизировать фронт пламени в нагретой

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

части канала. В [6] рассматривался противоточный теплообменник, состоящий из двух прилегающих друг к другу трубок, входящая смесь в нем подогревалась за счет взаимного теплообмена газов через перегородку. Было показано, что при интенсивном теплообмене между трубками теплообменника существует принципиальная возможность организации процесса горения бедных реакционных смесей в каналах с радиусом меньше критического. В [7] рассматривалось горение водородо-воздушной смеси в кольцеобразной микрорелке. Реакционная смесь протекала в полости между двумя концентрическими трубками. Внутренняя трубка была заполнена азотом, а внешняя образовывала наружную поверхность горелочного устройства. Расчеты показали, что азот, заполняющий внутреннюю трубку, позволял стабилизировать фронт пламени, несмотря на большие теплотери от смеси через внешнюю стенку.

В настоящей работе на основе подходов [4, 6] ставится задача о зажигании и горении бедной метано-воздушной смеси в U-образной трубке, внешние стенки которой считаются холодными, а внутренняя стенка, представляющая собой аналог инертного тела из [4], инициирует процесс горения. На схеме (рис. 1) приведен внешний вид конструкции. Холодная реакционная смесь со скоростью v , температурой T , относительной концентрацией горючей компоненты α , подается в устройство на границе $x = 0$ (область I на рис. 1, б). Смесь проходит через трубку и на границе $x = L$ меняет направление своего движения, на границе $x = 2L$ смесь вытекает через выходную трубку (область III, рис. 1, б). На рис. 1, а внутренняя стенка показана толстой черной линией на торце устройства, на рис. 1, б внутренней стенке соответствует область II, расположенная между входной и выходной трубками. Температура смеси на рис. 1, б обозначена T , температура внутренней стенки – T_1 , температура внешних стенок – T_s , температура поверхности внутренней стенки – $T_{1,s}$. Внутренняя стенка обменивается теплом с реакционной смесью,

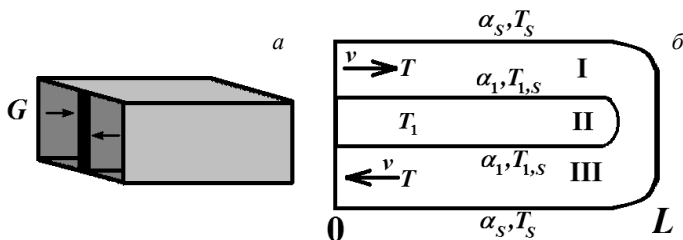


Рис. 1. Поля: а – модель U-образного горелочного устройства; б – горелочного устройства. I – входная трубка, II – внутреннее тело, III – выходная трубка

протекающей через входную и выходную части трубки. Реакционная газовая смесь обменивается теплом с внешней и внутренней стенками с коэффициентами теплообмена α_s и α_1 соответственно. Полагается, что в трубке протекают экзотермические химические реакции с аррениусовской кинетикой первого порядка. При постановке задачи приняты следующие допущения: расход газовой смеси считается постоянным, учитывается распределение температуры смеси и выгорания горючей компоненты только вдоль трубок, температура внутренней стенки определяется только вдоль трубок и в поперечном направлении считается однородной.

Для записи системы уравнений математической модели введем обобщенную координату x вдоль трубок горелочного устройства. Тогда общая длина трубок в этих координатах – $2L$, длина внутренней стенки устройства – L . Газ, протекая вдоль трубок, обменивается теплом с поверхностью внутренней стенки, длина которой составляет $2L$. Ввиду предположения об однородности температуры стенки в поперечном направлении для температуры поверхности внутренней стенки $T_{1,s}$ выполняются равенства $T_{1,s}(x) = T_1(x)$ при $0 < x < L$ и $T_{1,s}(x) = T_1(2L - x)$, при $L < x < 2L$.

С учетом сделанных допущений математическая постановка задачи в безразмерных переменных имеет вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + A_v \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + I_1 (\theta_{1,s}(\xi, \tau) - \theta) + I_s (\theta_s - \theta) + \eta \exp\left(\frac{\theta}{1 + Ar\theta}\right), \quad 0 \leq \xi \leq 2\xi_L, \quad (1)$$

$$\theta_{1,s}(\xi, \tau) = \theta_1(\xi, \tau), \quad 0 \leq \xi \leq \xi_L; \quad \theta_{1,s}(\xi, \tau) = \theta_1(2\xi_L - \xi, \tau), \quad \xi_L \leq \xi \leq 2\xi_L;$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} + A_v \frac{\partial \eta}{\partial \xi} = Le \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} - Td \eta \exp\left(\frac{\theta}{1 + Ar\theta}\right), \quad 0 \leq \xi \leq 2\xi_L; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = k_\chi \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \xi^2} + \frac{I_1}{k_{cp}} (\theta(\xi, \tau) - \theta_{1,s}) + \frac{I_1}{k_{cp}} (\theta(2\xi_L - \xi, \tau) - \theta_{1,s}), \quad 0 \leq \xi \leq \xi_L. \quad (3)$$

Краевые условия:

$$\tau = 0: \theta(\xi, 0) = \theta_b, \quad \theta_1(\xi, 0) = \theta_{1b}, \quad \eta(\xi, 0) = \eta_b; \quad (4)$$

$$\xi = 0: \frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial \xi} = A_v (\theta(0, \tau) - \theta_v), \quad \frac{\partial \theta_1(0, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad Le \frac{\partial \eta(0, \tau)}{\partial \xi} = A_v (\eta(0, \tau) - 1); \quad (5)$$

$$\xi = \xi_L: \frac{\partial \theta_1(\xi_L, \tau)}{\partial \xi} = 0; \quad (6)$$

$$\xi = 2\xi_L: \frac{\partial \theta(2\xi_L, \tau)}{\partial \xi} = \frac{\partial \eta(2\xi_L, \tau)}{\partial \xi} = 0. \quad (7)$$

В задаче (1) – (7) безразмерные параметры и переменные определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x}{x_m}, \quad \tau = \frac{t}{t_{ad}}; \quad \eta = \frac{a}{a_b}, \quad \theta = \frac{E}{RT_m^2} (T - T_m); \quad x_m = \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho_b}} t_{ad}, \\ t_{ad}(T_m) &= \frac{c\rho_b RT_m^2}{EQw_{0*}}, \quad A_v = \frac{c\rho_b v_b \sqrt{RT_m^2}}{\sqrt{\lambda EQw_{0*}}}, \quad Ar = \frac{RT_m}{E}, \quad Td = \frac{c}{Q} \frac{RT_m^2}{a_b E}, \\ k_{cp} &= \frac{d}{d_1} \frac{c_1 \rho_1}{c\rho}, \quad k_\chi = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1} \frac{c\rho_b}{\lambda}, \quad Le = \frac{Dc\rho_b}{\lambda}, \quad w_{0*} = \rho_b a_b k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_m}\right), \\ I_1 &= \frac{\tilde{\alpha}_1 RT_m^2}{EQw_{0*}}, \quad I_s = \frac{\tilde{\alpha}_s RT_m^2}{EQw_{0*}}, \quad \tilde{\alpha}_s = \frac{2\alpha_s}{d}, \quad \tilde{\alpha}_1 = \frac{\alpha_1(d_1 + d)}{d^2}. \end{aligned}$$

Здесь T_m – масштабная температура, c – теплоемкость, ρ – плотность, λ – коэффициент теплопроводности, v – скорость течения смеси, E – энергия активации, Q –

тепловой эффект реакции, x – пространственная координата, d – ширина трубки, a – концентрация горючей компоненты, R – универсальная газовая постоянная, k_0 – предэкспонент в законе Аррениуса, w_{0*} – скорость химической реакции при температуре T_m и начальном значении концентрации горючей компоненты a_b . Индексами 1, S , b , v – отмечены параметры внутренней и внешней стенок трубки, начальные и входные параметры соответственно, 1, S – параметры поверхности внутренней стенки. Параметр ξ_L соответствует длине горелочного устройства и внутренней стенки, отсюда общая протяженность трубок горелочного устройства – $2\xi_L$. Параметр I_S характеризует интенсивность теплообмена газа с внешней стенкой, I_1 – с поверхностью внутренней стенки, A_v – скорость течения газа, Ar , Td , Le – числа Аррениуса, Тодеса и Льюиса.

Решение задачи проводилось методом прогонки по неявной разностной схеме. В качестве горючей смеси была взята 2 % смесь метана и воздуха. Рассчитанные для нее безразмерные параметры: $k_{cp} = 221,8$, $Ar = 0,03$, $\eta_b = 1$, $Td = 4,74 \cdot 10^{-2}$, $k_\chi = 0,51$, $Le = 1$, $\theta_v = -21,8$, $\theta_b = -21,8$, $I_1 = 2,19$. Расчеты проводились для значения $\xi_L = 27,54$, общая длина трубок равнялась $2\xi_L = 55,08$. Начальная температура внутренней стенки T_{1b} принималась за масштабную, тогда соответствующая безразмерная температура равнялась $\theta_{1b} = 0$. Расчеты показали, что в зависимости от значений параметров I_S и A_v в системе реализуются высокотемпературное или низкотемпературное стационарное состояние либо колебательный режим.

На рис. 2 показано изменение положения координаты фронта пламени вдоль оси реактора во времени. За координату фронта пламени выбиралась точка пространства ξ_f , в которой значение концентрации горючей компоненты равнялось $\eta = 0,5$. Согласно рис. 2 окончательное установление режима работы происходит при больших временах τ , это связано с относительно большой протяженностью расчетной области. Кривая 1 на рис. 2 соответствует установившемуся колебательному режиму работы. Амплитуда и положение колебаний фронта горения определяется координатами $11 \leq \xi \leq 28$.

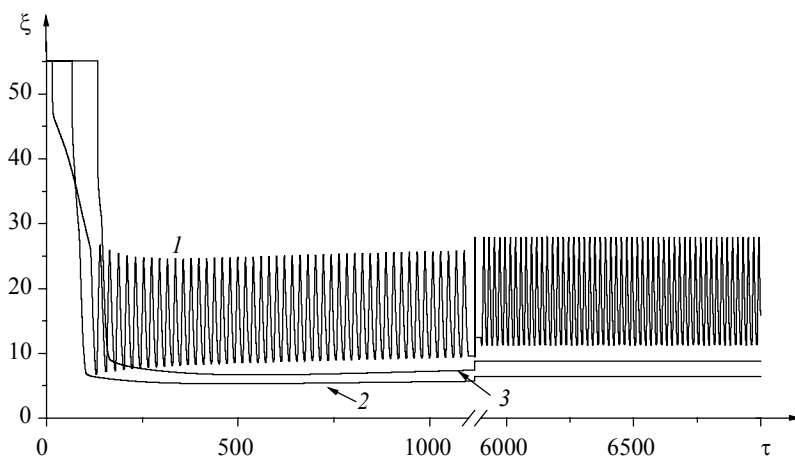


Рис. 2. Зависимость координаты положения фронта пламени от времени.
Кр. 1 – $I_S = 1,18 \cdot 10^{-2}$, $A_v = 3$; кр. 2 – $I_S = 1,18 \cdot 10^{-2}$, $A_v = 4$; кр. 3 – $I_S = 1,76 \cdot 10^{-2}$, $A_v = 4$

Распределения температуры и концентрации за период установившегося колебания представлены на рис. 3. Волна горения периодически перемещается из первой половины входной трубки в начало выходной трубки. При этом температура смеси в выходной трубке постоянна во времени и монотонно убывает от $\theta = 0$ до $\theta = -7$ от поворота до выхода. Кривые 1–3 на рис. 3 соответствуют этапу накопления горючей компоненты и охлаждению реакционной смеси. Затем происходит вспышка (кривая 4), формирование и распространение пламени навстречу потоку (кривые 5–7), которое из-за повышенной теплоотдачи в начале трубки останавливается (кривая 8), и затем цикл повторяется.

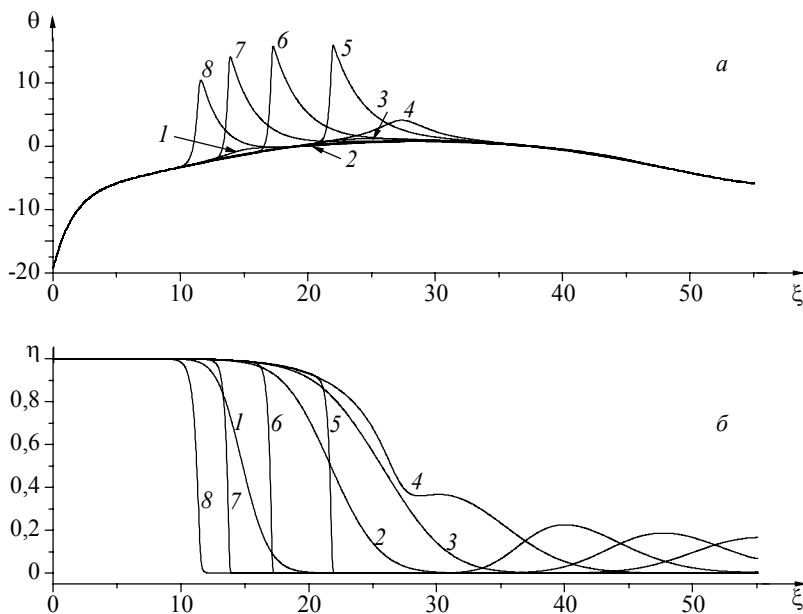


Рис. 3. Распределения температуры (а) и концентрации (б) по длине U-образной трубки в последовательные моменты времени через $\Delta t = 1,2$ за один период колебания. $I_S = 1,18 \cdot 10^{-2}$, $A_v = 3$

При увеличении A_v от 3 до 4 изменяется характер устанавливающегося режима работы – от колебательного режима работы система переходит к высокотемпературному стационарному состоянию (рис. 2, кривая 2). Характерное распределение температуры и концентрации для этого режима представлено на рис. 4. Согласно рис. 4 стационарное состояние устанавливается на глубине $\xi = 6,74$.

В стационарном высокотемпературном режиме фронт пламени при одинаковых значениях параметра A_v и разных I_S может находиться на различном расстоянии от входа в реактор. Изменение параметра I_S до значения $I_S = 1,76 \cdot 10^{-2}$ приводит к перемещению фронта горения в глубь реактора (рис. 2, кривая 3, $\xi_f = 8,65$). Увеличение I_S приводит к увеличению теплоотдачи от смеси во внешнюю среду. Если параметр I_S превышает некоторое критическое значение, то за счет высокой теплоотдачи система не успевает накопить достаточного количества тепла, чтобы произошло воспламенение, и реакционная смесь протекает через трубку без выгорания. Если параметр I_S не превышает критического значения, в системе устанавливается высокотемпературное стационарное состояние.

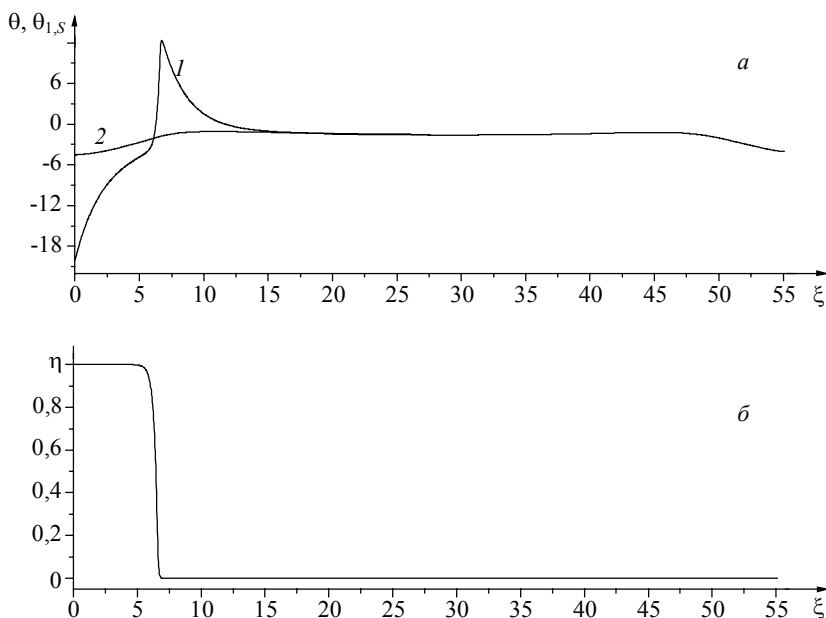


Рис. 4. Распределения температуры газа и температуры поверхности внутренней стенки θ и $\theta_{1,S}$ (а), относительной концентрации метана, η (б) по длине U-образной трубки в момент времени $\tau = 10000$. $I_S = 1,18 \cdot 10^{-3}$, $A_v = 4$. Кривые: 1 – $\theta(\xi, \tau)$, 2 – $\theta_{1,S}(\xi, \tau)$

Проведенные расчеты показали, что высокотемпературное стационарное состояние или колебательный режим устанавливаются для малых значений параметра I_S . Высокотемпературное стационарное состояние устанавливается при значениях A_v в интервале $2,9 \leq A_v \leq 6$, колебательный режим устанавливается для значений параметра $1,5 \leq A_v \leq 3$. Уменьшение параметра A_v при малых значениях параметра I_S приводит к тому, что в системе реализуется низкотемпературный режим горения, при этом горючая компонента практически полностью выгорает до выхода из реактора. Расчеты для значений $A_v = 1,4$, $I_S = 1,18 \cdot 10^{-2}$ показали, что максимальная температура смеси для установившегося состояния не превышает значения $\theta = 2,2$, и достигается в середине входной трубки. Горючая компонента интенсивно выгорает во входной трубке ($0 \leq \xi \leq 27,6$), в выходной трубке ($27,6 \leq \xi \leq 55,2$) относительная концентрация горючего уменьшается от 0,05 до 0,01. Температура поверхности внутренней стенки возрастает, максимум достигается в области перегиба U-образной трубки.

Были проведены расчеты реактора в два раза меньшей длины, $2\xi_L = 27,54$. Так как длина трубки по сравнению с предыдущим вариантом уменьшена в два раза, то сократилось время пребывания смеси в трубке. Смесь быстрее обменивается теплом с внутренней стенкой, это приводит к сокращению диапазона безразмерных параметров A_v и I_S , для которых устанавливается высокотемпературное стационарное состояние или колебательный режим работы. Расчеты показали, что высокотемпературное стационарное состояние устанавливается для диапазона значений параметров $2,9 \leq A_v \leq 3,5$, $0 \leq I_S \leq 3,5 \cdot 10^{-3}$. Колебательный режим работы реализуется в диапазоне значений параметров $2,6 \leq A_v \leq 2,9$, $0 \leq I_S \leq 1,2 \cdot 10^{-3}$. Уве-

лишение I_S приводит к тому, что смесь не успевает достаточно прогреться, и воспламенения не происходит. При увеличении A_v фронт пламени выносится входящим потоком за пределы трубки, уменьшение параметра A_v приводит к затуханию колебательного режима и срыву системы на низкотемпературное состояние.

Выводы

Проведено численное исследование воспламенения и горения 2 %-й метано-воздушной смеси в U-образной трубке. Показано, что в зависимости от значений параметра теплообмена I_S и параметра течения смеси A_v в системе устанавливается высокотемпературное или низкотемпературное стационарное состояние, либо колебательный режим.

Определено, что при увеличении длины трубки расширяются диапазоны значений параметров I_S и A_v , при которых происходит полное сгорание метано-воздушной смеси с низкой концентрацией метана. Показано, что для реактора большой длины возможно установление низкотемпературного режима горения смеси, в ходе которого горючая компонента практически полностью выгорает при относительно невысокой температуре реакционной смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов С.М. Наука о горении и проблемы современной энергетики // Российский химический журнал. 2008. № 6(ЛII). С. 129–134.
2. Перлмуттер Д. [Perlmutter D.] Устойчивость химических реакторов: пер. с англ. Б.И. Соколова, В.П. Пилявского / под ред. Н.С. Гурфейна. Л.: Химия, 1976.
3. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Манжос Е.В. и др. Иницирование горения газа в пористой среде внешним источником // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. № 2(5). С. 189–196.
4. Буркина Р.С., Моисеева К.М. Динамика химических процессов в проточном реакторе при теплообмене на боковой поверхности реактора и инертной насадке внутри него // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент. Караганда, 2012. С. 300–306.
5. Марута К., Минаев С.С., Парк Дж. К. и др. Особенности горения газа в узком нагретом канале // Физика горения и взрыва. 2004. № 5(40). С. 21–29.
6. Фурсенко Р.В., Минаев С.С. Устойчивость пламени с противоточным теплообменом // Физика горения и взрыва. 2005. № 2(41). С. 17–25.
7. Jejurkar S.Y., Mishra D.P. Numerical characterization of a premixed flame based annular microcombustor // Int. J. Hydrogen Energy. 2010. № 35. С. 9755–9766.

Статья поступила 12.02.2014 г.

Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. COMBUSTION MODES OF THE LEAN METHANE-AIR MIXTURE IN A U-SHAPED BURNER. Base on the model of a flowing reactor with an inert internal body, a numerical study of a lean methane-air mixture burning in a U-tube is carried out in the case of initiation of the combustion process by a preliminarily heated internal wall of the tube. The calculations were carried out for two values of a tube extent for revealing qualitative distinctions between established operating regimes. It is shown that, depending on the dimensionless parameter of heat exchange intensity in the reaction mixture on an external wall of the tube and dimensionless parameter of the mixture current, a high-temperature or low-temperature stationary regime, or an oscillatory operating mode can be implemented in the system. It is determined that the high-temperature stationary state is established at some distance from the input of the tube, and oscillatory modes are implemented in the top part of the tube; at the same time, the mixture in the bottom part of the tube has a decreasing temperature profile. It is shown that the

parameter of heat exchange intensity of the mixture at the external wall of the tube determines the depth of establishing the high-temperature steady state.

Keywords: lean methane-air mixture, heat and mass transfer process, ignition by the inner wall, steady and unstable operation modes of a burner

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. Frolov S.M. Nauka o gorenii i problemy sovremennoy energetiki (2008) Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. No. 6(LII), pp. 129–134. (in Russian)
2. Perlmutter D.D. Stability of chemical reactors. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1972.
3. Kakutkina N.A., Korzhavin A.A., Manzhos E.V., Rychkov A.D., V'yun A.V. Initsirovanie goreniya gaza v poristoy srede vneshnim istochnikom (2013) Interekspo Geo-Sibir'. No. 2(5), pp. 189–196. (in Russian)
4. Burkina R.S., Moiseeva K.M. Dinamika khimicheskikh protsessov v protochnom reaktore pri teploobmene na bokovoy poverkhnosti reaktora i inertnoy nasadke vnutri nego. Khaos i struktury v nelineynykh sistemakh. Teoriya i eksperiment. Karaganda, 2012, pp. 300–306. (in Russian)
5. Maruta K., Minaev S. S., Park Dzh. K., Oh K. S., Fudzhimori T., Fursenko R. V. Characteristics of microscale combustion in a narrow heated channel (2004) Combustion, Explosion and Shock Waves. No. 5(40), pp. 516–523.
6. Fursenko R.V., Minaev S.S. Flame stability in a system with counterflow heat exchange (2005) Combustion, Explosion, and Shock Waves. No. 2(41), pp. 133–139.
7. Jejurkar S.Y., Mishra D.P. Numerical characterization of a premixed flame based annular microcombustor (2010) International Journal of Hydrogen Energy. No. 35, pp. 9755–9766.