

РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ГОРЕНИЯ В ПОРИСТОЙ ГОРЕЛКЕ  
С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНЕГО ПОДОГРЕВА© 2006 г. Академик Ал. Ал. Берлин, А. С. Штейнберг, С. М. Фролов, А. А. Беляев,  
В. С. Посвянский, В. Я. Басевич

Поступило 16.06.2005 г.

В работе теоретически обоснован новый способ расширения концентрационных пределов горения газов в пористой горелке путем интенсификации предпламенных процессов с помощью внешнего подогрева.

Принцип сжигания топлива в условиях “избыточной энтальпии”, а также некоторые схемы практических горелок с внешними теплообменниками впервые предложены в [1, 2]. Горение газовой реагирующей смеси в твердом пористом каркасе – один из ярких примеров управления горением с помощью “внутреннего” теплообменника. Зона прогрева газового пламени вследствие высокой теплопроводности каркаса формируется под воздействием дополнительных тепловых потоков из прогретого каркаса [3–5]. Дополнительное тепловое воздействие на зону прогрева газового пламени приводит к увеличению скорости горения и расширению концентрационных пределов горения. Как следствие, применение пористого каркаса позволяет сжигать смеси, которые в обычных условиях не горят, а также смеси, сильно обедненные или обогащенные горючим. Кроме теплового воздействия на предпламенную зону предлагают использовать и химическое воздействие путем нанесения каталитического слоя на внутреннюю поверхность пор. Сжигание бедных смесей в каталитических и некаталитических пористых матрицах – один из перспективных методов снижения эмиссии вредных веществ (прежде всего окислов азота) в стационарных газотурбинных энергетических установках. Другое важное приложение – уничтожение вредных отходов и отравляющих веществ.

В данной работе для дальнейшего расширения концентрационных пределов горения по сравнению с [3–5] предложено использовать локальный внешний подогрев пористого каркаса. Некоторые качественные оценки принципиальной возможности такого приема были сделаны в [6]. Для

теоретического обоснования нового способа рассмотрели математическую задачу о горении газовой реагирующей смеси в пористом каркасе с внешним подогревом.

Пусть длинная трубка диаметром  $d$  с двумя открытыми концами заполнена однородным пористым каркасом пористостью  $\varepsilon \leq 1$  (при  $\varepsilon = 1$  каркас отсутствует) и газовой смесью с коэффициентом избытка горючего  $\Phi$  и температурой  $T = T_0$ . На внешней поверхности трубки может быть установлен нагреватель (например, электрический) длиной  $l$  и удельной тепловой мощностью  $q$ . После зажигания смеси в газе и в каркасе возникает тепловая волна с химическими превращениями – пламя. Чтобы удержать пламя в трубке, необходимо подавать свежую смесь с некоторой скоростью  $u$ , равной нормальной скорости пламени  $u_n$ . Задача состоит в определении  $u_n$  и пространственной структуры стационарного комплекса нагреватель – пламя, а также условий существования такого комплекса.

Для решения задачи примем следующие упрощающие допущения: 1) течение считали одномерным (все величины зависят от времени  $t$  и продольной координаты  $x$ ); 2) давление газа – постоянным,  $p = p_0$ ; 3) газ – идеальным; 4) пламя – ламинарным; 5) диффузию компонентов газовой смеси – независимой; 6) теплофизические свойства пористого каркаса – постоянными; 7) потери тепла в окружающую среду за счет излучения – пренебрежимо малыми; 8) химическое взаимодействие между газом и каркасом – несущественным и 9) процесс распространения тепла в каркасе – квазистационарным. Последнее означает, что профиль температуры в каркасе мгновенно подстраивается под тепловую волну в газе.

Введем следующие обозначения:  $M$  – число химических компонентов в газе;  $Y_j$  – массовая доля компонента  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ );  $\rho$  – плотность;  $c$  – теплоемкость;  $\lambda$  – теплопроводность;  $D_j$  – коэффициент диффузии компонента  $j$ ;  $\theta$  – источник выделения (или поглощения) тепла за счет химических реакций;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи между газом и пористым каркасом;  $w_j$  – измене-

ние концентрации компонента  $j$  в результате химических реакций;  $N$  – число элементарных химических реакций в газовой фазе;  $H_k$ ,  $A_k$ ,  $E_k$  и  $n_k$  – тепловой эффект, предэкспоненциальный множитель, энергия активации и показатель степени при температуре для  $k$ -й реакции;  $v'_{j,k}$  – стехиометрический коэффициент компонента  $j$ , являющегося реагентом в  $k$ -й реакции;  $v''_{j,k}$  – стехиометрический коэффициент компонента  $j$ , являющегося продуктом в  $k$ -й реакции;  $R^0$  – газовая постоянная;  $G_j$  – молекулярная масса  $j$ -го компонента;  $Re = \rho_0 u_n d_p \mu^{-1}$  – число Рейнольдса;  $d_p$  – приведенный диаметр пор в пористом каркасе;  $u_g$  – скорость газа ( $\rho_0 u_n = \rho_g u_g$ );  $\mu$  – вязкость;  $Z$  – число пор на единицу длины каркаса; индекс  $g$  относится к газовой фазе,  $s$  – к каркасу,  $0$  – к исходной смеси;  $j$  и  $k$  – номера химических компонентов и реакций.

В рамках принятых допущений задача о нахождении скорости  $u_n$ , распределений температуры и концентраций реагирующих веществ сводится к решению системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений:

уравнения распространения тепла в газе (стационарная волна):

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda_g \frac{dT_g}{dx} \right) - c_g \rho_0 u_n \frac{dT_g}{dx} + \theta(T_g, Y_j) + \frac{\alpha}{\varepsilon} (T_g - T_s) = 0, \quad (1)$$

уравнений непрерывности химических компонентов газовой смеси (стационарная волна):

$$\frac{d}{dx} \left( \rho_g D_j \frac{dY_j}{dx} \right) - \rho_0 u_n \frac{dY_j}{dx} + w_j = 0, \quad (2)$$

$$j = 1, 2, \dots, M,$$

и уравнения теплопроводности в пористом каркасе:

$$(1 - \varepsilon) \lambda_s \frac{d^2 T_s}{dx^2} + \alpha (T_g - T_s) + q = 0. \quad (3)$$

Неизвестными в задаче (1)–(3) являются не только функции  $T_g(x)$ ,  $Y_j(x)$ ,  $T_s(x)$ , но и скорость  $u_n$ .

Химические источники определяли по соотношениям [7]:

$$\theta = \sum_{k=1}^N H_k A_k T_g^{n_k} \exp\left(\frac{-E_k}{R^0 T_g}\right) \prod_{i=1}^M \left(\frac{Y_i \rho_g}{G_i}\right)^{v'_{i,k}}, \quad (4)$$

$$w_j = G_j \sum_{k=1}^N (v''_{j,k} - v'_{j,k}) A_k T_g^{n_k} \exp\left(\frac{-E_k}{R^0 T_g}\right) \times \prod_{i=1}^M \left(\frac{Y_i \rho_g}{G_i}\right)^{v'_{i,k}}. \quad (5)$$

Для связи между плотностью газа и температурой использовали уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho_g R^0 T_g \sum_{j=1}^M \frac{Y_j}{G_j}. \quad (6)$$

Для коэффициента теплоотдачи использовали соотношение [5]:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\lambda_g}{d_p^2} \left( 0.0426 + \frac{1.236}{L} \frac{L}{d_p} \right) Re, & \varepsilon < 1, \\ \frac{0.1464 \lambda_g}{d_p^2}, & \varepsilon = 1, \end{cases} \quad (7)$$

$$d_p = \frac{1}{Z} \left( \frac{4\varepsilon}{\pi} \right)^{0.5}, \quad (8)$$

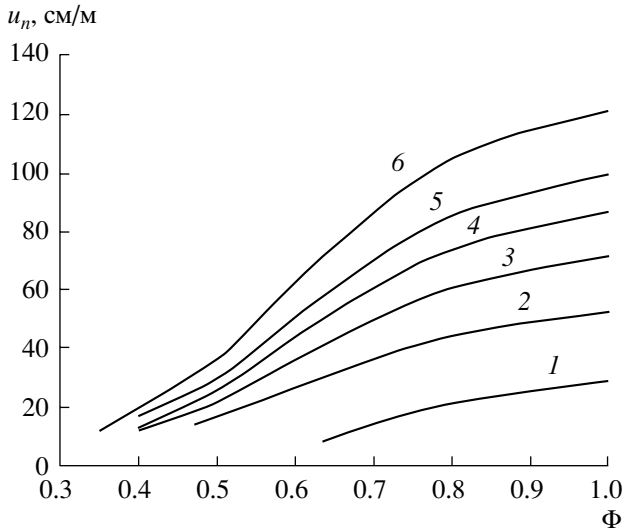
где  $L$  – характерный размер тепловой волны (в несколько раз больше толщины фронта пламени).

Скорость  $u_n$  может быть найдена только в том случае, когда уравнения (1)–(3) инвариантны относительно сдвига. Это означает, что если  $F(x)$  – решение задачи, то решением будет и  $F(x + \text{const})$ . Уравнения (1) и (2) этим свойством обладают, так как переменная  $x$  в них явно не входит. Этим же свойством должно обладать и уравнение (3), а следовательно, и функция  $q$ , характеризующая внешний подогрев.

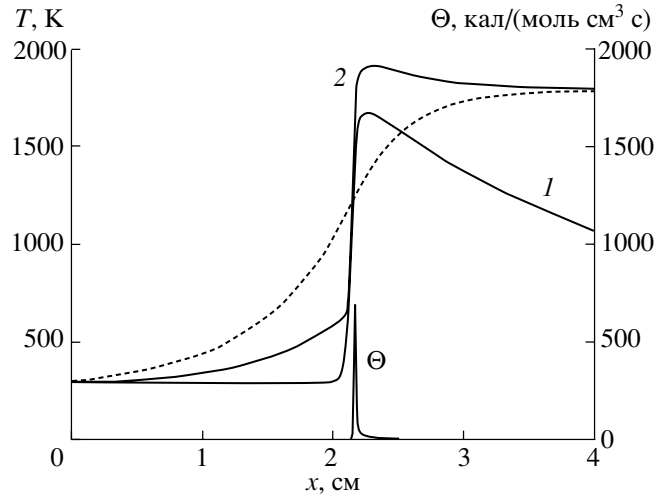
Предположим, что нагреватель имеет фиксированную длину  $l$  и его левый конец находится в точке  $x_1$ . Удельная мощность нагревателя определяется следующим образом:

$$q = \begin{cases} q_0, & x \in (x_1, x_1 + l) \\ 0, & x \notin (x_1, x_1 + l), \end{cases} \quad (9)$$

где  $q_0$  – постоянная величина. Чтобы функция  $q$  обладала требуемым свойством, необходимо как-то увязать положение левого конца нагревателя  $x_1$  с температурой газа  $T_g$ . Это можно сделать следующим способом. Задается некоторое расстояние  $r_g$  и вспомогательная температура  $T_g^0$ . Сначала из уравнения  $T_g(x_0) = T_g^0$  находим величину  $x_0$ , а затем с помощью равенства  $x_1 = x_0 + r_g$  – значение



**Рис. 1.** Зависимость скорости  $u_n$  от коэффициента избытка горючего  $\Phi$  при распространении пламени: 1 – в трубке с холодной стенкой ( $\epsilon = 1, T_s = T_0$ , критические условия:  $\Phi^* = 0.635, u_n = 7.85$  см/с); 2 – в трубке с пористым каркасом без подогрева; 3 – 6 – в трубке с пористым каркасом с подогревом ( $3 - 0.01\theta_{\max}, 4 - 0.02\theta_{\max}, 5 - 0.03\theta_{\max}, 6 - 0.05\theta_{\max}$ ).



**Рис. 2.** Распределение температуры и функции энерговыделения в пламени при  $\Phi = 0.67$  и  $q_0 = 0$ : сплошная линия – в газе, штриховая – в каркасе; 1 – в трубке без пористого каркаса, 2 – в трубке с пористым каркасом без подогрева;  $\theta$  – функция энерговыделения в пламени.

координаты  $x_1$ . Фактически в этом случае будем иметь:

$$q(x - x_0) = \begin{cases} q_0 & \text{при } r_g \leq x - x_0 \leq r_g + l \\ 0 & \text{при } x - x_0 < r_g, \quad x - x_0 > r_g + l. \end{cases} \quad (9')$$

Из (9') следует, что функция  $q$  зависит не просто от  $x$ , а от разности  $x - x_0$  и благодаря этому не зависит от сдвига. Вообще говоря, неизвестная скорость  $u_n$  будет функцией  $r_g$ .

Теплофизические свойства газовой смеси ( $c_{gj}, D_j$  и  $\lambda_g$ ) считали функциями температуры и давления и рассчитывали по формулам, приведенным в [8], используя данные [8, 9]. При проведении расчетов использовали детальный кинетический механизм окисления метана, описанный в [10]. Механизм включает 260 элементарных реакций (130 прямых и столько же обратных) с участием 31 компонента ( $\text{CH}_4, \text{O}_2, \text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{N}_2, \text{NO}, \text{O}, \text{H}, \text{N}, \text{OH}, \text{HO}_2, \text{H}_2\text{O}_2, \text{CH}, \text{CH}_2, \text{CH}_3, \text{HCO}, \text{H}_2\text{CO}, \text{CH}_3\text{O}, \text{NO}_2, \text{NO}_3, \text{NH}, \text{NH}_2, \text{NH}_3, \text{N}_2\text{H}_3, \text{N}_2\text{H}_4, \text{HNO}, \text{CN}, \text{HCN}, \text{NCO}$ ).

Граничные условия для (1)–(3) имеют вид

$$x \rightarrow -\infty, \quad T_g = T_s = T_0, \quad Y_j = Y_{j0}, \quad (10)$$

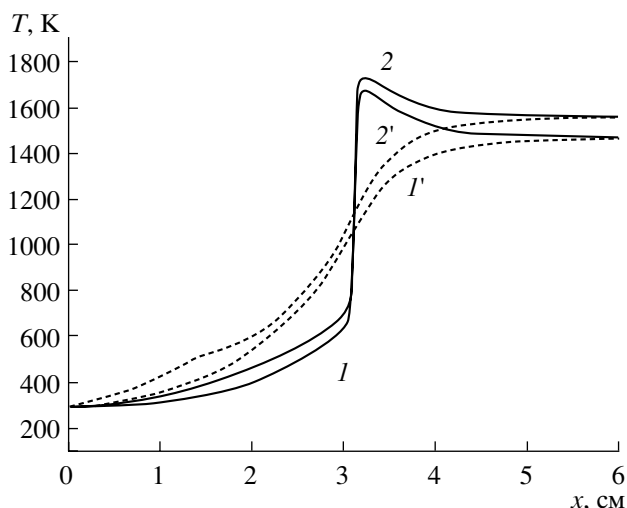
$$x \rightarrow +\infty, \quad \frac{dT}{dx} = \frac{dT_s}{dx} = \frac{dY_j}{dx} = 0. \quad (11)$$

Систему уравнений (1)–(3) с учетом зависимостей (4)–(9) и граничными условиями (10)–(11) решали численно методом установления [11], используя модификацию вычислительной программы [12].

Важнейшее преимущество метода установления состоит в хорошей сходимости итераций при разных начальных распределениях параметров задачи. Расчеты проводили для метано-воздушных смесей с  $\Phi \leq 1$  при  $T_0 = 293$  К и  $p_0 = 0.1$  МПа. Параметры пористого каркаса:  $\epsilon = 0.9, \lambda_s = \text{вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), Z = 8 \text{ см}^{-1}$ . Параметры внешнего источника:  $l = 0.4 \text{ см}, x_1 = 1.2 \text{ см}, T_g^0, q_0 = (0 - 0.05)\theta_{\max}$ , где  $\theta_{\max}$  – максимальная мощность энерговыделения в пламени в результате химических реакций при заданном  $\Phi$  при отсутствии внешнего подогрева (в случае бедных смесей, когда без внешнего подогрева распространение пламени невозможно, брали значение  $\theta_{\max}$  на пределе распространения пламени).

На рис. 1 приведены расчетные зависимости  $u_n(\Phi)$  в бедных метано-воздушных смесях. Видно, что внешний подогрев приводит к значительному расширению бедного концентрационного предела горения метана: от  $\Phi = 0.47$  при  $q_0 = 0$  (кривая 2) до  $\Phi \approx 0.35$  при  $q_0 = 0.05\theta_{\max}$ . Кроме того, скорости ламинарного пламени в трубке с каркасом и подогревом (кривые 2–6) значительно превышают скорости пламени в газе (кривая 1).

На рис. 2 показано сравнение расчетных профилей температуры газа (сплошные кривые) в стационарном ламинарном пламени при  $\Phi = 0.67$  при горении в трубке ( $\epsilon = 1$ ) и с пористым каркасом ( $\epsilon = 0.9$ ) при отсутствии внешнего подогрева ( $q_0 = 0$ ). Наличие каркаса приводит к значительному увеличению зоны прогрева в газовом пламени и более высокой температуре горения. Рас-



**Рис. 3.** Расчетное распределение температуры в пламени при  $\Phi = 0.5$ : сплошная линия – в газе, штриховая – в каркасе; 1 – в трубке с пористым каркасом без подогрева ( $q_0 = 0$ ), 2 – в трубке с пористым каркасом с подогревом ( $q_0 = 0.01\theta_{\max}$ ).

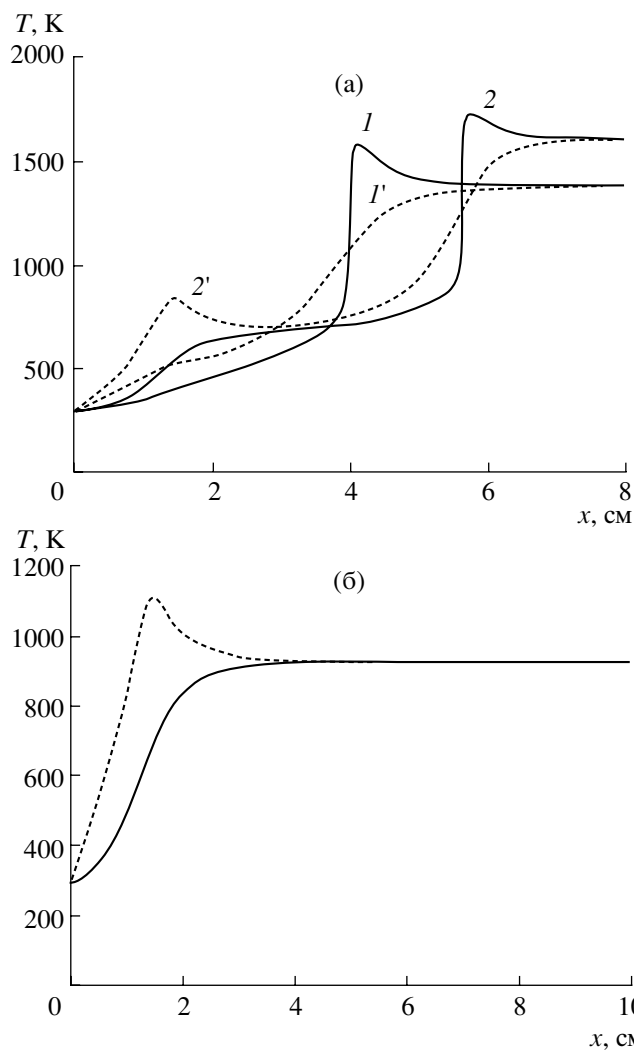
четные значения скорости пламени в двух рассмотренных примерах: 11.93 см/с в трубке без каркаса и 33.52 см/с в трубке с каркасом. Отметим, что на кривой 1 снижение температуры продуктов горения с удалением от фронта пламени связано с тепловыми потерями в стенку трубы.

На рис. 3 показано сравнение расчетных профилей температуры газа и пористого каркаса в стационарном ламинарном пламени при  $\Phi = 0.5$ . При  $\Phi = 0.5$  стационарное пламя в трубке без каркаса не существует (см. рис. 1). Из сравнения кривых 1' и 2' следует, что внешний подогрев увеличивает температуру в предпламенной зоне и способствует более быстрому распространению пламени: скорость горения без подогрева равна 16.52 см/с, а с подогревом – 21.20 см/с.

На рис. 4а показано сравнение расчетных профилей температуры газа и пористого каркаса в стационарном ламинарном пламени при  $\Phi = 0.4$ . Значения скорости пламени для двух этих случаев равны 12.10 и 19.71 см/с соответственно. Отметим, что без внешнего подогрева распространение пламени при  $\Phi = 0.4$  уже невозможно.

На рис. 4а показано сравнение расчетных профилей температуры газа и пористого каркаса в стационарном ламинарном пламени при  $\Phi = 0.4$ . Значения скорости пламени для двух этих случаев равны 12.10 и 19.71 см/с соответственно. Отметим, что без внешнего подогрева распространение пламени при  $\Phi = 0.4$  уже невозможно.

Представляет интерес изменение концентрации окислов азота в бедных метано-воздушных пламенах, получаемых в трубках с пористым каркасом с внешним подогревом и при его отсут-



**Рис. 4.** Расчетное распределение температуры в пламени в трубке с пористым каркасом с подогревом: сплошная линия – в газе, штриховая – в каркасе; а –  $\Phi = 0.4$ ; 1 –  $q_0 = 0.01\theta_{\max}$ , 2 –  $q_0 = 0.05\theta_{\max}$ ; б –  $\Phi = 0.35$ ,  $q_0 = 0.05\theta_{\max}$ .

ствии. В табл. 1 приведены расчетные значения концентраций окислов азота в продуктах горения (“быстрый” NO, так как вклад “термического” NO фактически отсутствует) в зависимости от температуры газа в продуктах  $T_{g1}$  при разных условиях. Из табл. 1 видно, что по мере усиления внешнего подогрева при одинаковых температурах газовых продуктов реакции количество окислов азота уменьшается и достигает очень малых значений на уровне 2.72 ppm (ppm – мольная доля на миллион). Расчет показывает, что, например, при  $\Phi = 0.4$  и 0.5 количество NO в термодинамически равновесных продуктах горения составляет 277 и 792 ppm соответственно. Соответствующие равновесные температуры горения равны 1278 и 1478 К. Отметим, что для образования такого количества NO необходимы очень большие време-

**Таблица 1.** Расчетные значения температуры газа и концентраций окислов азота в продуктах горения

№	$T_{g1}, K$	$\Phi$	$[CH_4]_0, \%$	$\frac{q_0}{\Theta_{max}}$	$T_0, K$	$[NO], ppm$	$J$
1	$1935 \pm 35$	0.75	7.30	0	293	47.6	0
		0.67	6.58	0.01	293	41.0	0.11
		0.6	5.93	0.02	293	30.2	0.18
		0.6	5.93	0.03	293	35.7	0.23
		0.55	5.46	0.05	293	28.3	0.28
2	$1810 \pm 25$	0.67	6.58	0	293	29.2	0
		0.6	5.93	0.01	293	24.4	0.11
		0.55	5.46	0.02	293	19.0	0.16
		0.55	5.46	0.03	293	22.2	0.20
3	$1680 \pm 15$	0.6	5.93	0	293	18.0	0
		0.55	5.46	0.01	293	15.5	0.09
		0.5	4.99	0.03	293	12.1	0.17
		0.45	4.51	0.05	293	9.61	0.30
		0.55	5.46	0	293	11.3	0
4	$1585 \pm 20$	0.5	4.99	0.01	293	8.69	0.09
		0.45	4.51	0.03	293	7.32	0.22
		0.4	4.03	0.05	293	5.93	0.38
		0.45	4.51	0.02	293	6.47	0.18
5	$1534 \pm 13$	0.4	4.03	0.03	293	7.32	0.30
		0.45	4.51	0.01	293	5.09	0.11
		0.4	4.03	0.02	293	3.84	0.25
6	$1468 \pm 8$	0.4	4.03	0	500	3.21	0
		0.4	4.03	0	293	6.44	0
7	$1400 \pm 2$	0.5	4.99	0	293	6.44	0
		0.4	4.03	0.01	293	2.72	0.16

на пребывания продуктов горения при указанных температурах.

В табл. 1 представлен также результат расчета при  $\Phi = 0.4$  (№ 6) при отсутствии внешнего подогрева, но при повышенной температуре исходной смеси ( $T_0 = 500 K$ ). Видно, что по выходу NO локальный подогрев с постоянной удельной мощностью  $g_0$  эквивалентен повышению начальной температуры смеси до величины, обеспечивающей такую же температуру продуктов горения ( $\approx 1468 K$ ).

В последнем столбце таблицы стоит величина  $J$ , характеризующая отношение интегральной энергетической характеристики действия внешнего подогрева к аналогичной характеристике химической реакции в газовой фазе.

Таким образом, применение локального внешнего подогрева приводит к (1) расширению бедного концентрационного предела горения, (2) увеличению скорости горения и (3) значительному снижению выхода NO. Для заметного расши-

рения бедного предела горения метана требуется внешний подогрев, который по мощности значительно меньше суммарного энерговыделения в ламинарном пламени на пределе распространения без подогрева. Физический механизм расширения пределов распространения пламени в рассмотренном варианте пористой горелки связан с тепловым влиянием на зону прогрева газового пламени. Какое-либо значительное влияние предпламенных химических реакций, вызванных внешним подогревом, на характеристики горения в расчетах не обнаружено.

Внешний подогрев может быть использован в камерах сгорания с пористым наполнителем стационарных газотурбинных установок для обеспечения ультранизкой эмиссии NO. Ввиду малых времен пребывания газа в таких камерах сгорания и дальнейшего расширения в турбине, эмиссионные показатели будут связаны главным образом с “быстрым”, а не “термическим” NO. Несмотря на обнаруженный эффект эквивалентности локального подогрева и повышения температуры смеси,

поступающей в камеру сгорания, использование локального внешнего подогрева представляется более эффективным для снижения тепловых потерь и повышения взрывобезопасности процесса. Возможность оптимизации пористой горелки путем использования переменной по длине удельной тепловой мощности  $q_0$  заслуживает дополнительного исследования.

Работа выполнена при частичной поддержке Отделением химии и наук о материалах в рамках Программы №1 фундаментальных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Weinberg F.J.* // Nature. 1971. V. 233. № 5317. P. 239–241.
2. *Weinberg F. J.* Proc. XV Intern. Symp. on Combustion. Pittsburgh (Pa): Comb. Inst., 1974. P. 1–17.
3. *Takeno T., Sato K.* // Combust. Sci. and Technol. 1979. V. 20. P. 73–84.
4. *Babkin V. S., Korzhavin A. A., Bunev V. A.* // Combust. and Flame. 1991. V. 87. № 2. P. 182–190.
5. *Barra A. J., Diepvens G., Ellzey J. L., Henneke M. R.* // Combust. and Flame. 2003. V. 134. № 4. P. 369–379.
6. *Ушаковский О.В., Худяев С.И., Штейнберг А.С.* // Хим. физика. 1988. Т. 7. № 10. С. 1400–1407.
7. *Вильямс Ф.А.* Теория горения. М.: Наука, 1971. 616 с.
8. *Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей. Ленинград: Химия, 1982. 592 с.
9. *Kee R.J., Rupley F.M., Miller J.A.* The Chemkin Thermodynamic Data Base. Sandia Rept SAND87-8215B UC-4, August 1993. SAND87-8215.
10. *Basevich V.Ya.* In: Handbook of Heat and Mass Transfer. Houston, Gulf, 1999. V. 4. P. 769.
11. *Годунов С.К., Рябенский В.С.* Разностные схемы. М.: Наука, 1977. 440 с.
12. *Беляев А.А., Посвянский В.С.* Государственный фонд алгоритмов и программ СССР. // Алгоритмы и программы. Информ. бюл. 1985. № 3(66).