

ДИНАМИКА ГОРЕНИЯ МЕТАНА В УСЛОВИЯХ КАМЕРЫ МГД-ГЕНЕРАТОРА

Р. С. Тюльпанов, С. А. Михальчук

(Ленинград)

Организация процесса горения в камере МГД-генератора имеет некоторые особенности по сравнению с обычными камерами сгорания. Прежде всего, это малые значения коэффициента избытка воздуха ($\alpha_s < 1$), высокий уровень температур (до 3200 К), наличие ионизирующих добавок и высокие скорости движения продуктов сгорания. Эти условия требуют специальных расчетных и экспериментальных исследований.

Равновесный состав продуктов сгорания при горении метана с различными ионизирующими добавками изучался достаточно подробно [1—3]. Это позволило правильно оценить работу канала преобразования энергии. Однако с точки зрения работы самой камеры сгорания этих расчетов явно недостаточно. Необходимо проведение расчетов, учитывающих кинетические характеристики системы и влияние аэродинамических условий на протекание процесса горения в камере МГД-генератора.

В камерах сгорания существующих МГД-генераторов газообразное топливо подводится в виде системы отдельных струй в горячий поток окислителя, содержащего кислород и азот. Ионизирующие добавки подаются либо вместе с топливом, либо в виде отдельных струй их водного раствора. При этом в камере МГД-генератора формируется пламя, структура которого может рассматриваться как структура микродиффузионного пламени благодаря наличию большого количества отдельных струй и высокому уровню турбулентности. Расчет динамики состава такого пламени может быть выполнен достаточно надежно по схеме реакций в рамках модели изотропной турбулентности.

Предварительно до проведения основных расчетных исследований горения метана с добавкой K_2CO_3 в потоке окислителя (обогащенного кислородом воздуха) необходимо проверить кинетическую схему, составленную на основании имеющихся к настоящему времени представлений об этом сложном процессе. В основе этих представлений лежит механизм вырожденного разветвления, предложенный в [4]. Он сводится к последовательному отщеплению атомов водорода от молекулы метана с образованием нестабильных радикалов CH_3 , CH_2 , CH как промежуточных продуктов. Основная кинетическая схема (набор реакций), использованная для описания горения метана в камере сгорания МГД-генератора, аналогична схеме, составленной для горения метана в обычных топочных устройствах [5]. Эта схема дополнена набором элементарных химических реакций побочной линии, приводящей к образованию свободного углерода [6]. При составлении схемы сделан соответствующий отбор по количественному вкладу той или иной реакции в диапазоне температур $T = 1600 \div 3000$ К.

Набор реакций ионизации включает реакции: ионизации при неупругом столкновении атомов калия с молекулами компонентов, содержащихся в пламени [7], ионизации при неупругом столкновении стабильных молекул N_2 с другими молекулами [8], возбуждения молекул N_2 с последующим образованием метастабильных молекул N_2^* [9] и реакцию Пеннинга [10], как наиболее вероятные источники образования свободных электронов в проводящей плазме. К сожалению, значения кинетических констант многих реакций, да и сами реакции, не известны с достаточной точностью. Сама схема разложения K_2CO_3 также недостаточно разработана. Существует определенное мнение, что последовательные

Таблица 1

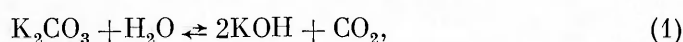
m	Реакция	Прямая			Обратная		
		A	a	E/R, К	A	a	E/R, К
1/2	$H + O_2 \rightleftharpoons OH + O$	$3 \cdot 10^{14}$	0	8 810	$2,48 \cdot 10^{13}$	0	660
3/4	$O + H_2 \rightleftharpoons OH + H$	$3 \cdot 10^{14}$	0	4 030	$1,3 \cdot 10^{14}$	0	2 490
5/6	$H_2 + OH \rightleftharpoons H + H_2O$	$3 \cdot 10^{14}$	0	3 020	$1,33 \cdot 10^{15}$	0	10 950
7/8	$OH + OH \rightleftharpoons O + H_2O$	$3 \cdot 10^{14}$	0	3 020	$3,12 \cdot 10^{15}$	0	12 510
9/10	$H_2 + M \rightleftharpoons 2H + M$	$18,5 \cdot 10^{19}$	-1	54 000	10^{16}	0	0
11/12	$H_2O + M \rightleftharpoons OH + H + M$	$9,66 \cdot 10^{21}$	-1	62 200	10^{17}	0	0
13/14	$OH + M \rightleftharpoons O + H + M$	$8 \cdot 10^{19}$	-1	52 500	10^{16}	0	0
15/16	$O_2 + M \rightleftharpoons 2O + M$	$5,8 \cdot 10^{19}$	-1	60 600	$6 \cdot 10^{14}$	0	0
17/18	$H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2OH$	$2,72 \cdot 10^{13}$	0	29 200	10^{10}	0	10 320
19/20	$N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$	$3,8 \cdot 10^{13}$	0	4 000	$3,63 \cdot 10^{12}$	0	20 000
21/22	$O + N_2 \rightleftharpoons NO + N$	$5,01 \cdot 10^{13}$	0	37 500	$2,95 \cdot 10^{13}$	0	100
23/24	$NO + M \rightleftharpoons N + O + M$	$7,94 \cdot 10^{21}$	-3/2	75 000	$1,82 \cdot 10^{15}$	-1/2	0
25/26	$N_2 + M \rightleftharpoons 2N + M$	$2 \cdot 10^{17}$	-1/2	112 500	$1,1 \cdot 10^{16}$	0	0
27/28	$N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2NO$	$9,12 \cdot 10^{24}$	-5/2	64 200	$3,09 \cdot 10^{13}$	—	31 550
29	$NO + O \rightleftharpoons N + O_2$	$2 \cdot 10^{11}$	0	20 000	—	—	—
30	$2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$	$2,51 \cdot 10^{13}$	0	12 500	—	—	—
31/32	$NO_2 + H_2 \rightleftharpoons NO + H_2O$	$2,4 \cdot 10^9$	0	9 250	—	—	—
33/34	$N + OH \rightleftharpoons NO + H$	$5,01 \cdot 10^{11}$	1/2	5 000	$9,54 \cdot 10^{13}$	-1	0
35/36	$H + NO_2 \rightleftharpoons NO + OH$	$5,37 \cdot 10^{14}$	0	870	10^{14}	0	600
37/38	$H + NO \rightleftharpoons HNO$	$9,68 \cdot 10^{13}$	-1	0	$5,01 \cdot 10^{19}$	-1	24 500
39/40	$H_2 + NO \rightleftharpoons H + HNO$	$3,09 \cdot 10^{14}$	0	28 950	$3,9 \cdot 10^{12}$	1/2	0
41/42	$CH_4 + OH \rightleftharpoons CH_3 + H_2O$	$1,41 \cdot 10^{14}$	0	3 250	$1,26 \cdot 10^{13}$	0	11 280
43/44	$CH_4 + H \rightleftharpoons CH_3 + H_2$	10^{15}	0	6 300	$3,16 \cdot 10^{12}$	0	5 100
45/46	$CH_4 + O \rightleftharpoons CH_3 + OH$	$1,67 \cdot 10^{14}$	0	5 000	10^{13}	0	5 000
47/48	$CH_3 + O_2 \rightleftharpoons CH_2O + OH$	$3,16 \cdot 10^{15}$	0	6 000	10^{13}	0	5 000
49/50	$CH_2O + OH \rightleftharpoons CHO + H_2O$	$5,02 \cdot 10^{15}$	0	4 000	10^{13}	0	5 000
51/52	$CH_2O + O \rightleftharpoons CHO + OH$	10^{14}	0	4 000	10^{15}	0	5 000
53/54	$CH_2O + H \rightleftharpoons CHO + H_2$	$6,16 \cdot 10^{11}$	1/2	1 350	10^{13}	0	5 000
55/56	$CHO \rightleftharpoons CO + H$	10^{10}	0	3 000	10^{13}	0	5 000
57/58	$CO + OH \rightleftharpoons CO_2 + H$	$3,16 \cdot 10^{11}$	0	400	$5,5 \cdot 10^{13}$	0	12 750
59/60	$CO + O \rightleftharpoons CO_2$	$1,38 \cdot 10^{12}$	0	1 900	$2,51 \cdot 10^{11}$	0	55 000
61/62	$CH_4 + M \rightleftharpoons CH_3 + H + M$	$3,98 \cdot 10^{14}$	0	50 040	$1,38 \cdot 10^{12}$	0	-2 310
63/64	$H + O_2 + M \rightleftharpoons HO_2 + M$	$1,7 \cdot 10^{15}$	0	-480	$2,51 \cdot 10^{15}$	0	23 090
65/66	$C_2H_4 + H \rightleftharpoons C_2H_5$	$2,24 \cdot 10^{14}$	0	240	$3,8 \cdot 10^{13}$	0	19 120
67/68	$CHO + O \rightleftharpoons CO + OH$	10^{14}	0	0	—	—	—
69/70	$CHO + H \rightleftharpoons CO + H_2$	10^{14}	0	0	—	—	—
71/72	$CHO + OH \rightleftharpoons CO + H_2O$	10^{14}	0	0	—	—	—
73/74	$C_2H_4 + OH \rightleftharpoons CH_3 + CH_2O$	10^{13}	0	480	$3,16 \cdot 10^{12}$	0	8 300
75/76	$CH_2O + M \rightleftharpoons CHO + H + M$	$5 \cdot 10^{16}$	0	36 100	$3,4 \cdot 10^{14}$	0	3 600
77/78	$CH_4 + O \rightleftharpoons CH_2 + H_2O$	$2,05 \cdot 10^{13}$	0	3 950	$5,1 \cdot 10^{11}$	0	3 950
79/80	$CH_3 + OH \rightleftharpoons CH_2 + H_2O$	$6,02 \cdot 10^{13}$	0	1 390	—	—	—
81/82	$CH_2 + O \rightleftharpoons CH + OH$	10^{13}	0	0	—	—	—
83/84	$CH_2 + H \rightleftharpoons CH + H_2$	10^{13}	0	0	—	—	—
85/86	$CH_2 + OH \rightleftharpoons CH + H_2O$	10^{13}	0	0	—	—	—

Окончание табл. 1

m	Реакция	Прямая			Обратная		
		A	a	E/R, К	A	a	E/R, К
87/88	$\text{CH} + \text{H} \rightleftharpoons \text{C} + \text{H}_2$	10^{14}	0	0	—	—	—
89/90	$\text{K} + \text{X} \rightleftharpoons \text{K}^+ + \text{e} + \text{X}$	$5,85 \cdot 10^{14}$	0,5	50 000	—	—	—
91/92	$\text{N}_2 + \text{M} \rightleftharpoons \text{N}_2 + \text{e} + \text{M}$	$1,2 \cdot 10^4$	3/2	181 000	—	—	—
93/94	$\text{CO}_2 + \text{M} \rightleftharpoons \text{CO}_2^+ + \text{e} + \text{M}$	$1,2 \cdot 10^4$	3/2	160 000	—	—	—
95/96	$\text{N}_2 + \text{e} \rightleftharpoons \text{N}_2^* + \text{e}$	10^{12}	0	0	—	—	—
97/98	$\text{K} + \text{N}_2^* \rightleftharpoons \text{K}^+ + \text{N}_2 + \text{e}$	10^{12}	0	-17 000	—	—	—

Примечание. Размерность A (моль, см, с); X=N., O₂.

этапы разложения K₂CO₃ в высокотемпературной среде продуктов горения углеводородов сводятся к следующим реакциям [3]:



В диапазоне высоких температур нет надежных констант разложения K₂CO₃. В работе [11] экспериментально показано, что в пламени, содержащем добавки солей калия, при $T \approx 2300$ К равновесное отношение концентраций $[\text{KOH}]/[\text{K}] \approx 0,2$. В [3] получено расчетом, что при $T = 2400 \div 3000$ К $[\text{KOH}]/[\text{K}] \approx 0,5$. Это позволяет выбрать значения начальных концентраций атомов К. Однако в этом случае остается открытым вопрос о влиянии атомов К на протекание основного процесса горения. Известно, что добавка солей щелочных металлов оказывает ингибирующее действие на распространение углеводородного пламени [12]. В [13] сделаны расчеты времени испарения сухой добавки и раствора K₂CO₃.

Учитывая состояние вопроса, была составлена следующая схема реакций ионизации в камере МГД-генератора (табл. 1). Не для всех реакций предложенной схемы имеются значения кинетических констант, и по мере накопления достоверных экспериментальных данных эти стадии будут включаться. Константы скоростей реакций определялись по известному закону Аррениуса:

$$K_m = A_m T^{a_m} \exp(-E_m/RT), \quad (3)$$

где $m = 1, 2, \dots, m_0$; m_0 — число реакций; E — энергия активации; A — предэкспоненциальный множитель; R — газовая постоянная.

Так как кинетические константы многих реакций определены не очень точно, кинетическая схема нуждается в проверке и сопоставлении с экспериментальными данными или более точными расчетами. Учитывая это, концентрации наиболее важных компонентов, полученных в кинетическом расчете, доведенном до равновесия, были сопоставлены с соответствующими данными термодинамических расчетов из работ [1—3] (табл. 2). Отмечается достаточно хорошее совпадение концентраций основных стабильных компонентов CO₂, H₂O, CO, e, т. е. кинетическая схема достоверна. Что касается концентраций окислов азота, особенно NO, то в кинетическом расчете не достигнута равновесная концентрация, так как это требует больших затрат машинного времени. Эта часть схемы проверена раньше при исследовании горения метана с укороченной схемой реакций [5].

Подтверждение справедливости схемы реакций позволило сформулировать и записать систему уравнений, описывающих динамику выгорания газообразного топлива в условиях камеры МГД-генератора. Уравнения основаны на разработанной ранее модели диффузионного пламени, учитывающей влияние внутреннего тепло- и массообмена на дина-

Т а б л и ц а 2

Параметры	Настоящая работа	[1]	[2]	[2]	[3]
α	1	1	1	1	1
γ	0,4	0,4	0,45	0,45	0,235
p , бар	1	1	1,5	1,5	1
T , К	3300	2800	2800	3200	3200
τ , с	$1,6 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—
O_2	0,05	0,035	—	—	—
CH_4	0,055	—	—	—	—
H_2O	0,209	0,281	0,25	0,2	—
CO_2	0,0735	0,082	—	—	—
CO	0,075	0,067	0,06	0,09	0,095
CH_2O	$1,09 \cdot 10^{-7}$	—	—	—	—
C	0,00051	—	0	0	—
NO	$\uparrow 0,73 \cdot 10^{-5}$	0,011	0,01	0,015	0,015
NO_2	$\uparrow 2,35 \cdot 10^{-6}$	—	$3 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	—
e	$1,04 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	10^{-4}	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
N_2	0,43	0,419	—	—	—
H_2	0,052	0,033	0,03	0,06	—

П р и м е ч а н и е. $\alpha = 1$; γ — мольная доля O_2 в окислителе; τ — время процесса; $O_2 \dots H_2$ — мольная концентрация компонентов; стрелки указывают, что равновесное значение еще не достигнуто.

мрку выгорания газообразного топлива [14]. Наличие высоких температур и восстановительной среды заставило несколько усложнить уравнения и рассчитать значения всех концентраций и температуры в двухзонной модели. Предполагается, что реакции идут в зонах горения с $\alpha = 1$ (реакторах) и окружающей восстановительной среде, в которой распределены эти зоны. Области реакции и окружающая восстановительная среда обмениваются теплом и компонентами через границы соприкосновения.

При известных законах изменения скоростей потока задачу можно свести к квазиодномерной в постановке Коши:

$$\frac{dc_i}{dt} = \sum_{m=1}^{m_0} v_{im} K_m \prod_{n=1}^{n_0} c_n^{v_{nm}} - \beta_i (c_i - c'_i) - \beta_T \frac{c_i}{T} \frac{dT}{dt}, \quad (4)$$

$$\frac{dc'_i}{dt} = \beta_i (c_i - c'_i) \delta_0, \quad (5)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = Q - \beta_\alpha (T - T') \quad (6)$$

$$\rho' c_p \frac{dT'}{dt} = Q - \beta_\alpha (T - T') \delta_0, \quad (7)$$

где n_0 — число компонентов взаимодействующих в данном реакторе; $i, n = 1, \dots, n_0$; t — время; c_i — концентрация компонента в реакторах; c'_i — концентрация компонента в окружающем пространстве; β_i — коэффициент обмена компонентом i между реактором и средой; β_T — коэффициент объемного расширения смеси газов в реакторах; K_m — константа скорости для m -й реакции; v_{nm} — порядок реакции компонента n в реакции m ; δ_0 — отношение суммарного объема реакторов к объему окружающей среды; ρ и ρ' — суммарная плотность; c_p и c'_p — теплоемкость в реакторах и в окружающей среде; β_α — коэффициент обмена теплом; T и T' — температура в реакторах и окружающей среде.

Тепловой эффект Q находился в соответствии с текущими значениями концентраций компонентов суммированием тепловых эффектов обра-

зования отдельных компонентов на элементарных стадиях, каждая из которых обладает определенными кинетическими константами:

$$Q = Q_i \frac{dc_i}{dt}, \quad (8)$$

где Q_i — теплота образования компонента i . Значения констант скоростей реакций K_m вычислялись по формуле (3). Кинетические константы приведены в табл. 1.

Коэффициенты обмена для каждого компонента находились в соответствии с представлениями, развитыми в [14, 15]. Они связаны с основными турбулентными характеристиками реагирующего потока и коэффициентами молекулярной диффузии:

$$\beta_i = \frac{\beta}{Pr_i} = \frac{10v'\Lambda}{\Lambda_r^2 Pr_i}, \quad (9)$$

где β — коэффициент турбулентного обмена; Λ — лагранжев интегральный масштаб; v' — среднеквадратичное значение пульсации скорости; Λ_r — средний размер очагов горения; $\beta_\alpha = \beta/Pr$ — коэффициент обмена теплом; Pr — число Прандтля; $\delta_0 = \sqrt[3]{\Lambda^3 - \Lambda_r^3/\Lambda_r}$; $\beta_T = 1$ при изобарическом и $\beta_T = 0$ при изохорическом процессах.

Рассмотренная модель содержит одну экспериментальную константу Λ_r в дополнение к экспериментальным константам полей изотропной турбулентности (Λ и v'). Начальные концентрации исходных стабильных компонентов CH_4 , O_2 , H_2 , N_2 задавались исходя из соответствующих значений давления, суммарного коэффициента избытка воздуха α_z и доли O_2 в окислителе. При этом в зонах горения предполагалось $\alpha = 1$, а в окружающей их среде концентрации компонентов брались такие, чтобы получить заданное α_z . Начальные концентрации нестабильных компонентов и продуктов реакции задавались приближенно из условий равновесной их концентрации при T_0 .

Приведенная система уравнений решалась численно на ЭВМ с использованием несколько измененного алгоритма из [16]. Рассчитаны несколько вариантов при начальных параметрах: $p = 1, 2, 7, 4, 10$ и 3 бар, $T_0 = 1600$ К, $\alpha_z = 2,0; 1,05; 0,9; 0,78$, $\beta = 4 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^5$ 1/с, $\gamma = 0,3$ и 0,4, содержание добавки K_2CO_3 по отношению к топливу 0,0015 и 1,5 %.

Расчеты показали, что за сравнительно короткое время ($5 \cdot 10^{-6} \div 10^{-5}$ с) проходят все основные реакции горения даже при $\alpha_z = 0,78$. Температура в зонах горения при этом достигает значений, близких к адиабатической. Свободные электроны также образуются за это время, причем основной вклад в этот процесс вносит реакция ионизации атомов К даже при следовых концентрациях K_2CO_3 .

Последующий период характеризуется сравнительно медленным выгоранием образовавшихся CO , CH_2O и некоторым ростом концентрации свободного углерода. В течение этого второго периода интенсивно идет реакция $NO_x = NO + NO_2$, концентрация окислов азота далеко еще не достигает равновесных значений при $t = 10^{-5}$ с. Следует отметить, что если $\alpha_z > 1$, то непрерывно растут концентрации NO и NO_2 вместе с временем реагирования. Так, расчет, проведенный до $t = 4 \cdot 10^{-5}$ с для $\alpha_z = 2$, $p = 2$ бар, $T_0 = 1600$ К, $\gamma = 0,3$, показал, что содержание NO_x составляет $\approx 0,38$ г/м³ (при нормальных условиях) и далее меняется очень мало в сторону некоторого увеличения. При $\alpha_z < 1$ сначала концентрация NO_x повышается, а затем при $t \approx 10^{-5}$ резко падает до очень малых значений. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

Для выбора режима работы камеры сгорания МГД-генератора необходимо знать динамику образования вредных компонентов и их концентрации по окончании основных реакций горения. Как показали расчеты, существенно влияют на концентрации компонентов (без значительного изменения компоновки самой камеры) значения α_z и β .

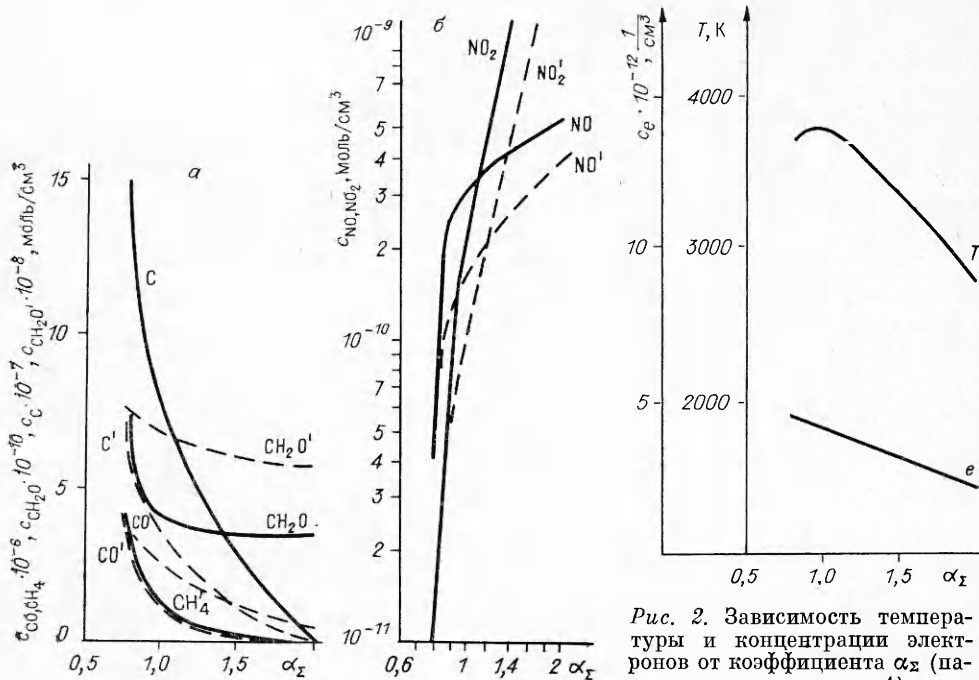


Рис. 1. Концентрации углеродсодержащих компонентов продуктов сгорания (а) и окислов азота (б) от коэффициента α_z . $T_0 = 1600$ К, $\gamma = 0,3$, $\beta = 4 \cdot 10^{-5}$ 1/с, $p = 10,3$ бар, $K_2CO_3 = 0,15$ %, $\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ с. — в зонах горения; — — — в пространстве между зонами горения.

Рис. 2. Зависимость температуры и концентрации электронов от коэффициента α_z (параметры см. рис. 1).

На рис. 1, а видно значительное снижение концентраций всех компонентов с ростом α_z , особенно в области $\alpha_z = 0,8 \div 0,95$. Обратная зависимость наблюдается для концентраций окислов азота (рис. 1, б). При этом, как указывалось ранее, равновесные значения NO и NO₂ в конце

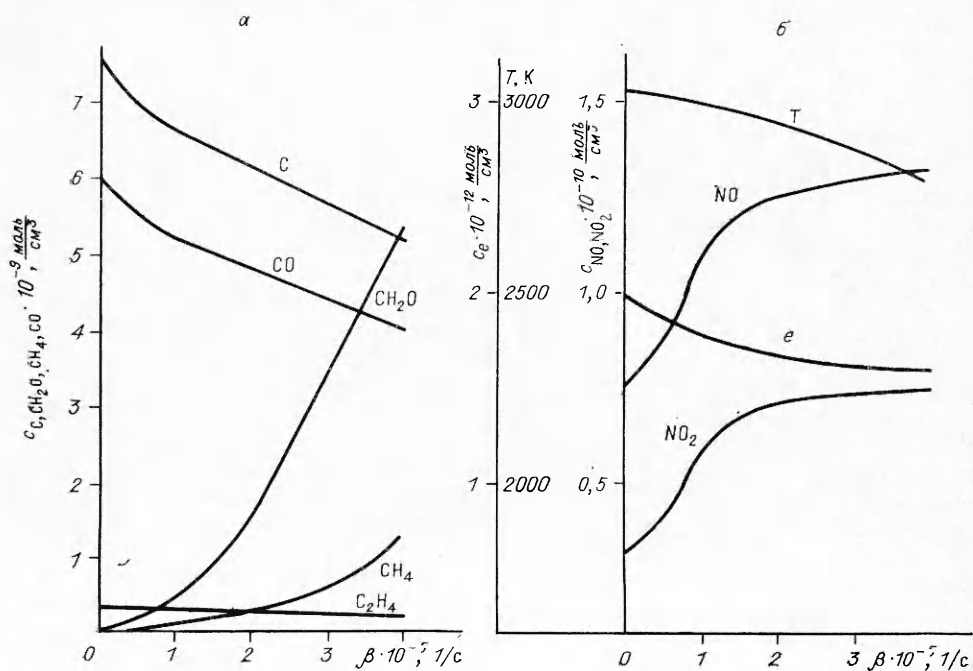


Рис. 3. Зависимость концентраций углеродсодержащих компонентов продуктов сгорания (а) и температуры, концентрации окислов азота и электронов (б) от коэффициента β . $T_0 = 1600$ К, $\gamma = 0,3$, $\alpha_z = 2$, $p = 10,3$ бар, $K_2CO_3 = 0,15$ %, $\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ с.

горения еще не достигнуты, однако относительное изменение правильно описывает эту тенденцию для NO_x . Концентрация электронов, как и адиабатическая температура, несколько падает с ростом α_z в диапазоне $\alpha_z > 1$, что достаточно хорошо согласуется с общими представлениями о процессе (рис. 2).

Как и при горении метана в обычных диффузионных пламенах, при повышенных значениях p , T , характерных для камер МГД-генератора, наблюдается ощутимая зависимость концентраций компонентов от коэффициента турбулентного обмена β . На рис. 3 приведены эти зависимости для одного из режимов в фиксированный момент времени горения. Из приведенных расчетов ясно, что оптимальные режимы лежат в области $\alpha_z \approx 0,95$ и $\beta \approx 10^5$ 1/с при $p = 7 \div 10$ бар, $T_0 = 1600$ К, $\gamma = 0,3 \div 0,4$ и нет необходимости в уменьшении коэффициента избытка воздуха $\alpha_z < 0,95$, а также в искусственной турбулизации потока. Более точные параметры могут быть получены при проведении оптимизации с учетом принятой модели и уточненных данных по ущербу от загрязнений среды на основе подхода, описанного в [47].

ЛИТЕРАТУРА

1. Недоспасов А. В., Побережский Л. П., Чернов Ю. Г. Состав и свойства рабочих тел МГД-генераторов открытого типа.— М.: Наука, 1977.
2. Кучерявый В. И., Метелюк С. А., Репа И. И. Состав и термодинамические свойства многокомпонентных химически реагирующих газовых смесей МГД-установки.— Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, 1977.
3. Yashio Mori, Kasutomo Ohtake, Mitsuyoshi Yamamoto et al. Bull. JSME, 1968, 11, 4, 241.
4. Kondratiev V. N. // 10th Intern. Symp. on Comb.— Pittsburg, 1965.
5. Тюльпанов Р. С., Михальчук С. А. ФГВ, 1984, 20, 4, 50.
6. Аравин Г. С., Власов П. А., Карасевич Ю. К. и др. ФГВ, 1982, 18, 49.
7. Kelly R., Padley P. J. Proc. Roy. Soc. Lond., 1972, A327, 1540, 345.
8. Агафонов В. П., Вертушкин В. К., Глазков А. А. и др. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике.— М.: Машиностроение, 1972.
9. Кондратьев В. В., Никитин Е. Е. Химические процессы в газах.— М.: Наука, 1981.
10. Смирнов В. Н. Введение в физику плазмы.— М.: Наука, 1975.
11. Хейхорст А., Сагден Т. Низкотемпературная плазма.— М.: Мир, 1967.
12. Баратов А. И., Вогман Л. П., Кобзарь В. П. и др. ФГВ, 1976, 12, 1, 72.
13. Павлов В. П., Иорданова Т. В., Константинова В. И. Разработка методов расчета и теоретической анализ течения в МГД-канале.— М.: ИВТАН СССР, 1980.
14. Тюльпанов Р. С. Диффузионные турбулентные пламена.— Л.: ЛГУ, 1981.
15. Тюльпанов Р. С. // Тепломассообмен.— V.— Минск, 1976.
16. Библиотека алгоритмов 1 б— 50 б: Справочное пособие/Под ред. В. А. Трапезникова.— М.: Сов. радио, 1975.
17. Тюльпанов Р. С., Михальчук С. А. // Теория и практика сжигания газа.— Л.: Недра, 1971.

Поступила в редакцию 14/IV 1988

УДК 536.423.1 + 662.62 : 662.611

О ДИФфуЗИОННОМ РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СРЕДЕ

А. М. Головин, В. Р. Песочин
(Москва)

Горению угольных частиц в высокотемпературной среде посвящены работы [1—7] и др., содержащие обзоры основной литературы по теории горения сферической частицы в квазистационарном приближении в отсутствие натекающего потока.