

## ЛИТЕРАТУРА

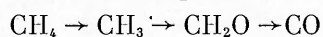
1. W. A. Sirignano. Comb. Sci. and Technol., 1972, 6, 1—2, 95.
2. В. Л. Ефремов, Б. Я. Колесников.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, 1980.
3. А. С. Мелихов, В. И. Потякин. Там же.
4. T. Kashiwagi, D. L. Newman. Comb. Flame, 1976, 26, 2, 163.
5. M. Sibulkin, A. G. Hansen. Comb. Sci. and Technol., 1975, 10, 1—2, 85.
6. W. J. Chan, J. S. J'ien. Comb. Sci. and Technol., 1978, 18, 3—4, 139.
7. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14, 6, 240.
8. В. Г. Левич. Докл. АН СССР, 1956, 109, 5, 975.
9. С. К. Асланов. Докл. АН УССР, 1976, А, 5, 406.
10. А. С. Плешанов. ФГВ, 1979, 15, 3, 32.
11. Р. М. Асеева, Г. Е. Заиков. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981.
12. A. L. Berlad. Mater. Sci. Space Appl. Space Process. 1977.
13. C. Huggett.— In: Combust. Exp. Zero-Grav. Labor. New York, 1981.
14. В. П. Самсонов, С. А. Аbruков и др. ФГВ, 1982, 18, 6, 45.
15. Д. А. Кардашов. Синтетические клеи. М.: Химия, 1976.
16. В. Иост. Взрывы и горение в газах. М.: ИЛ, 1952.
17. Г. М. Махвиладзе, С. Б. Щербак. ФГВ, 1980, 16, 4, 30.
18. A. H. Kimzey. Inst. of Environmenta Scienses, 1966.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА НА ОБРАЗОВАНИЕ ОКИСЛОВ АЗОТА В ДИФФУЗИОННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПЛАМЕНАХ МЕТАНА

*Р. С. Тюльпанов, С. А. Михальчук*  
(Ленинград)

В [1] показано, что параметры потока влияют на образование окислов азота при горении водорода в воздухе. В настоящей работе предпринято расчетное исследование этого вопроса применительно к метану, скорость горения которого в воздухе меньше, чем водорода.

Для описания кинетики высокотемпературного окисления метана всеобщее признание получил механизм, представляющий эту реакцию как цепную с вырожденным разветвлением [2, 3]. Основная цепь состоит в последовательном отрыве атомов водорода от молекулы метана по схеме



с последующим окислением до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Разветвление осуществляется так же, как и для водорода, через образование активных атомов Н, О и радикала ОН.

В работах [4, 5] проведена проверка известных схем окисления метана по нескольким экспериментальным параметрам. В частности, одной из удачных схем для давления выше атмосферного является схема [6].

При выборе конкретной схемы окисления  $\text{CH}_4$  необходимо учитывать условия протекания реакций и цель расчетных исследований. Для пламен метана в топочных устройствах характерны окислительная среда, высокий уровень температур и давлений. В этих условиях для оценки образования окислов азота, в соответствии с работами [4, 6], составлена рабочая схема окисления метана, включающая наиболее важные реакции в основной реакционной зоне.

В отличие от схемы, рекомендованной для этих условий в [6], в настоящей работе не включена реакция образования  $\text{HO}_2$ . Введение этой реакции в кинетическую схему в высокотемпературной области все еще остается проблематичным из-за отсутствия четких экспериментальных доказательств как в [6], так и в других работах. Также следует отметить, что в настоящей работе в отличие от схемы [7] для высокотемпературного

Таблица 1

Номера реакций	Реакция	Прямая			Обратная		
		A	n	E/R	A	n	E/R
1/2	$\text{CH}_4 + \text{OH} \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$1,413 \cdot 10^{14}$	0	3 250	$1,26 \cdot 10^{13}$	0	11 280
3/4	$\text{CH}_4 + \text{H} \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{H}_2$	$10^{15}$	0	6 300	$3,16 \cdot 10^{12}$	0	5 100
5/6	$\text{CH}_4 + \text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{OH}$	$1,697 \cdot 10^{14}$	0	5 000	$10^{13}$	0	5 000
7/8	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_2\text{O} + \text{OH}$	$3,16 \cdot 10^{15}$	0	5 000	$10^{13}$	0	5 000
9/10	$\text{CH}_2\text{O} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$	$5,02 \cdot 10^{15}$	0	4 000	$10^{13}$	0	5 000
11/12	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{OH}$	$10^{14}$	0	4 000	$10^{15}$	0	5 000
13/14	$\text{CH}_2\text{O} + \text{H} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{H}_2$	$6,16 \cdot 10^{11}$	1/2	1 350	$10^{13}$	0	5 000
15/16	$\text{HCO} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}$	$10^{15}$	0	3 000	$10^{13}$	0	5 000
17/18	$\text{CO} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}$	$3,16 \cdot 10^{11}$	0	400	$3,02 \cdot 10^{15}$	0	16 650
19/20	$\text{CO} + \text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2$	$1,38 \cdot 10^{10}$	0	2 900	$2,31 \cdot 10^{12}$	0	5 500
21/22	$\text{H} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{O}$	$3 \cdot 10^{14}$	0	8 810	$2,48 \cdot 10^{13}$	0	660
23/24	$\text{O} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{H}$	$3 \cdot 10^{14}$	0	4 030	$1,3 \cdot 10^{14}$	0	2 490
25/26	$\text{H}_2 + \text{OH} \rightleftharpoons \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$3 \cdot 10^{14}$	0	3 020	$1,33 \cdot 10^{15}$	0	10 950
27/28	$\text{OH} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$3 \cdot 10^{14}$	0	3 020	$3,12 \cdot 10^{15}$	0	12 510
29/30	$\text{H}_2 + \text{M} \rightleftharpoons 2\text{H} + \text{M}$	$18,5 \cdot 10^{19}$	-1	54 000	$10^{16}$	0	0
31/32	$\text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightleftharpoons \text{OH} + \text{H} + \text{M}$	$9,66 \cdot 10^{21}$	-1	62 200	$10^{17}$	0	0
33/34	$\text{OH} + \text{M} \rightleftharpoons \text{O} + \text{H} + \text{M}$	$8 \cdot 10^{19}$	-1	52 500	$10^{16}$	0	0
35/36	$\text{O}_2 + \text{M} \rightleftharpoons 2\text{O} + \text{M}$	$5,8 \cdot 10^{19}$	-1	60 600	$6 \cdot 10^{14}$	0	0
37/38	$\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{OH}$	$2,72 \cdot 10^{13}$	0	29 200	$10^{10}$	0	10 320
39/40	$\text{N} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{O}$	$3,8 \cdot 10^{13}$	0	4 000	$3,63 \cdot 10^{12}$	0	20 000
41/42	$\text{O} + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{N}$	$5,01 \cdot 10^{13}$	0	37 500	$2,95 \cdot 10^{13}$	0	100
43/44	$\text{N}_2 + \text{M} \rightleftharpoons 2\text{N} + \text{M}$	$2 \cdot 10^{17}$	-1/2	112 500	$1,1 \cdot 10^{16}$	-1/2	0
45/46	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$	$2,12 \cdot 10^{24}$	-5/2	64 200	$3,09 \cdot 10^{13}$	0	31 550
47/48	$\text{NO} + \text{O} \rightleftharpoons \text{NO}_2$	$2 \cdot 10^{11}$	0	20 000	$2,51 \cdot 10^{13}$	0	12 500
49/50	$\text{N} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{NO} + \text{H}$	$5,01 \cdot 10^{11}$	1/2	5 000	$9,54 \cdot 10^{18}$	-1	0
51/52	$\text{H} + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{OH}$	$5,37 \cdot 10^{14}$	0	870	$10^{14}$	0	600
53/54	$\text{H} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{HNO}$	$9,68 \cdot 10^{18}$	-1	0	$5,01 \cdot 10^{19}$	-1	24 500
55/56	$\text{H}_2 + \text{NO} \rightleftharpoons \text{H} + \text{HNO}$	$2,09 \cdot 10^{14}$	0	28 950	$3,9 \cdot 10^{12}$	1/2	0

Примечание. Размерность A в мономолекулярных реакциях — 1/с, в бимолекулярных — см<sup>3</sup>/(моль·с), в тримолекулярных — см<sup>6</sup>/(моль<sup>2</sup>·с).

окисления метана вместо двух реакций



оставлена только первая. Опущены реакции термического разложения  $\text{CH}_4$  и  $\text{CH}_2\text{O}$  и реакции образования более тяжелых углеводородов. Основанием к этому является анализ, проведенный в [3, 6]. Однако совершенно очевидно, что при высокотемпературном окислении метана в среде с недостатком кислорода и особенно для исследования процессов образования сажи эти стадии нужно включать.

Полная рабочая схема реакций окисления метана в воздухе с учетом реакций разветвления и реакций синтеза окислов азота из атмосферных азота и кислорода включает 56 реакций. В схеме используются все обратные реакции, так что расчеты можно проводить до равновесных концентраций компонентов. В табл. 1 приведены реакции и значения кинетических констант, принятые в расчетной схеме, в основном по данным работ, ссылки на которые содержатся в [1, 8]. Наблюдается некоторое расхождение в значениях кинетических констант между настоящей работой и [6]. Численный расчет кинетической схемы, включающей приведенные в табл. 1 реакции, для изотермического случая показал существенное увеличение времени индукции по сравнению с данными экспериментов [6]. Поскольку в принятой укороченной схеме используется только часть возможных путей образования конечных продуктов, потребовалось уве-

личить значения констант скоростей реакций 15 и 17, чтобы получить одинаковые времена индукции в диапазоне давлений от атмосферного и выше. В соответствии с этим изменены величины кинетических констант указанных реакций для проведения расчетов в неизотермических условиях. Константы скоростей реакций находили в соответствии с законом Аррениуса

$$k_j = A_j T^n \exp(-E_j/RT), \quad (3)$$

где  $j = 1, \dots, 56$  по числу реакций в кинетической схеме;  $A$  — предэкспоненциальный множитель;  $E$  — энергия активации;  $T$  — температура;  $R$  — газовая постоянная;  $n$  — числовой показатель.

Для описания процессов химических взаимодействий в условиях диффузионного турбулентного пламени использовали физическую модель, описанную в [1]. Согласно принятой модели горение идет в очагах или зонах, распределенных в движущемся потоке. Между зонами горения и окружающей средой происходит молекулярно-турбулентный обмен. Принимая ряд допущений, можно записать следующие уравнения концентрации  $c_i$  компонентов O, H, OH, HNO, NO, NO<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>O, HCO, CO, CO<sub>2</sub>, участвующих в реакциях в зонах горения, концентраций соответствующих компонентов  $c'_i$  вне зон горения и температуры  $T$  в зонах горения:

$$\frac{dc_i}{dt} = \left( \frac{dc_i}{dt} \right)_x - \beta_i (c_i - c'_i), \quad (4)$$

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

$$\frac{dT}{dt} = \left( \frac{dT}{dt} \right)_x - \beta_\alpha (T - T_0) \delta_0 \exp(-\beta_\alpha \delta_0 t), \quad (6)$$

где  $\left( \frac{dc_i}{dt} \right)_x$  и  $\left( \frac{dT}{dt} \right)_x$  — изменение концентраций компонентов и температуры в зонах горения за счет химических реакций по принятой кинетической схеме и температурного расширения;  $t$  — время;  $\beta_i = \beta/Pr_i$  — коэффициент обмена  $i$ -го компонента между зоной горения и средой;  $\beta_\alpha = \beta/Pr$  — то же, для температуры;  $Pr$  — число Прандтля;  $Pr_i$  — диффузионное число Прандтля для  $i$ -го компонента;  $\beta = 10\Lambda v'/l^2$ ;  $\Lambda$  — лагранжев масштаб турбулентности;  $v'$  — среднеквадратичная скорость пульсаций потока;  $l$  — средний размер зон горения;  $\delta_0$  — коэффициент, определяемый структурой пламени и зависящий от суммарного коэффициента избытка воздуха  $\alpha_z$ . Значение  $\delta_0 = 1$  соответствует суммарному коэффициенту избытка воздуха в факеле  $\alpha_z \approx 2$ . Индекс 0 отвечает начальной температуре или концентрации.

При написании уравнений принято допущение — пренебрежение теплом, расходуемым на работу расширения. Оно позволяет вместо уравнения для энтальпии многокомпонентной системы использовать уравнение для температуры.

Типичный график изменения стабильных компонентов и температуры во времени для одного из вариантов представлен на рис. 1. Видно, что процесс образования конечных продуктов горения метана практически уже завершается к моменту интенсивного роста концентраций окислов азота. Концентрации нестабильных активных частиц (H, O, OH, HCO, CH<sub>3</sub>) имеют максимумы в области начала резкого повышения температуры, а концентрация атомов N продолжает увеличиваться, но с меньшей скоростью.

Динамика изменения концентраций основных компонентов при горении метана в воздухе качественно напоминает соответствующую динамику горения водорода, хотя и количественно имеются заметные различия. Это вызвано прежде всего замедлением суммарной скорости реакции горения CH<sub>4</sub> по сравнению со скоростью горения H<sub>2</sub>. В соответствии с этим отставание образования окислов азота от образования конечных

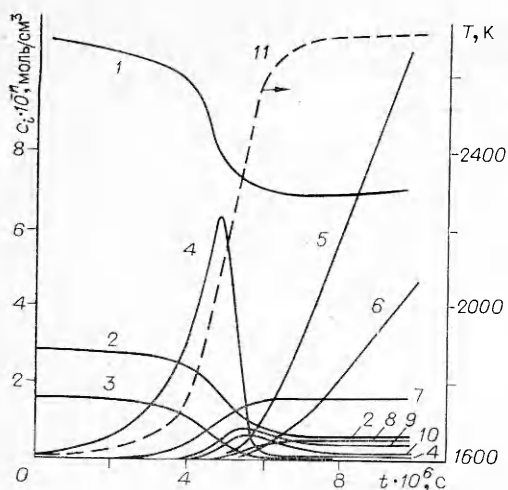


Рис. 1. Зависимость концентраций компонентов и температуры от времени горения ( $T_0 = 1600$  К;  $\beta = 0,4 \cdot 10^6$  1/с;  $[\text{CH}_4]_0 = 1,6 \cdot 10^{-6}$  моль/см<sup>3</sup>;  $[\text{CH}_4]_0/[\text{O}_2]_0 = 0,55$ ;  $[\text{O}_2]_0/[\text{N}_2]_0 = 0,27$ ;  $\delta_0 = 1$ ).  
 1 — N<sub>2</sub>; 2 — O<sub>2</sub>; 3 — CH<sub>4</sub>; 4 — CH<sub>2</sub>O; 5 — NO; 6 — NO<sub>2</sub>; 7 — H<sub>2</sub>O; 8 — CO<sub>2</sub>; 9 — CO; 10 — H<sub>2</sub>; 11 — T. 1-3, 7-10 — n=6; 4 — n=7; 5, 6 — n=12.

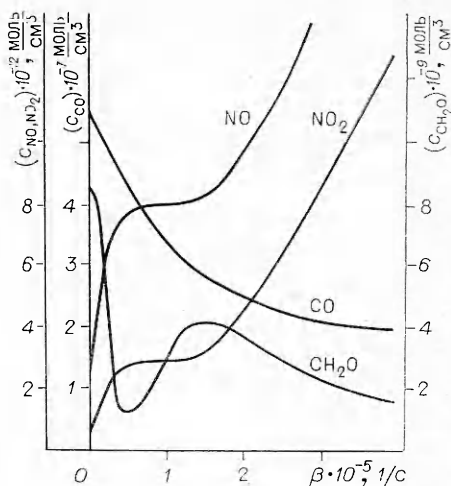
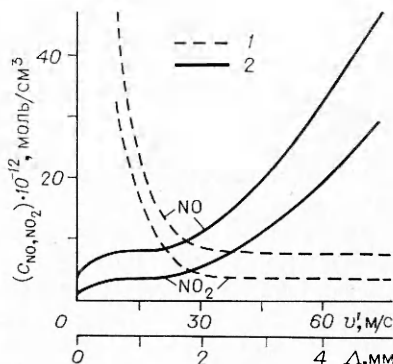


Рис. 2. Зависимость концентраций NO, NO<sub>2</sub>, CO и CH<sub>2</sub>O в конце факела от коэффициента обмена  $\beta$  ( $T = 1600$  К,  $[\text{CH}_4]_0 = 1,6 \cdot 10^{-6}$  моль/см<sup>3</sup>,  $[\text{CH}_4]_0/[\text{O}_2]_0 = 0,55$ ,  $[\text{O}_2]_0/[\text{N}_2]_0 = 0,27$ ,  $\delta_0 = 1$ ).

Рис. 3. Зависимость концентраций NO и NO<sub>2</sub> от масштаба турбулентности (1) и от пульсационной скорости (2);  $\tau_k = 0,9 \cdot 10^{-5}$  с.  
 1 —  $v' = 15$  м/с; 2 —  $\Lambda = 3$  мм.



продуктов при горении метана менее выражено. Рассмотренная схема диффузионного пламени позволяет определить динамику изменения концентраций компонентов по мере выгорания при изменении различных параметров, в том числе характеристик турбулентности потока.

На рис. 2 представлены значения концентрации некоторых молекул при фиксированном времени  $\tau_k = 0,9 \cdot 10^{-5}$  с. Видно значительное увеличение концентрации окислов азота с ростом  $\beta$ , хотя степень выгорания (по CO и CH<sub>2</sub>O) увеличивается. Однако при  $\beta = (0,5 \div 2) \cdot 10^5$  1/с рост [NO] и [NO<sub>2</sub>] существенно замедляется при существенном снижении [CO] и особенно CH<sub>2</sub>O. Приведенные на рис. 2 значения концентраций еще далеки от равновесных, и для больших времен значения [CO] и [CH<sub>2</sub>O] будут уменьшаться, однако при этом будут существенно возрастать концентрации окислов азота.

По-видимому, величина  $\beta = 2 \cdot 10^5$  1/с близка к оптимальному значению этого параметра, при котором целесообразно вести процесс сжигания метана в технических устройствах.

Интересно определить зависимость концентрации NO<sub>x</sub> в конце факела не только от такого суммарного параметра, как  $\beta$ , но и от общепринятых характеристик турбулентности  $\Lambda$  и  $v'$ . При этом нужно задать размер очага  $l$  или, что более удобно, значение  $l/\Lambda$ , определяющее структуру диффузионного пламени. Для горения CH<sub>4</sub> в воздухе при  $\alpha_2 \approx 2$  ориентировочно принято  $l/\Lambda = 0,8$ . Для этих условий на рис. 3, 1 приведены рас-

Таблица 2

$p$ , ата	$\frac{[\text{CH}_4]_0}{[\text{O}_2]_0}$	$\tau_K$ , с	$T_K$ , К	$\eta$	$[\text{NO}]_K$ , моль/см <sup>3</sup>	$[\text{NO}_2]_K$ , моль/см <sup>3</sup>	$[\text{CO}]_K$ , моль/см <sup>3</sup>	$[\text{CH}_2\text{O}]_K$ , моль/см <sup>3</sup>
2	0,50	$1,06 \cdot 10^{-5}$	2612	0,94	$1,36 \cdot 10^{-11}$	$7,2 \cdot 10^{-12}$	$2,79 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-9}$
10	0,48	$1,34 \cdot 10^{-3}$	3159	0,94	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$1,41 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-11}$
		$1,93 \cdot 10^{-6}$	3244	0,98	$4,25 \cdot 10^{-10}$	$9,54 \cdot 10^{-11}$	$1,36 \cdot 10^{-7}$	$3,26 \cdot 10^{-11}$

четные значения концентраций окислов азота от масштаба турбулентности  $\Lambda$ .

Видно существование некоторой области значений  $\Lambda = 1,5 \div 2,0$  мм, где значения концентраций NO и NO<sub>2</sub> возрастают еще не очень сильно. Масштаб турбулентности  $\Lambda$  связан с основными геометрическими характеристиками систем, в которых осуществляется процесс горения (для большинства систем  $\Lambda/d = 0,02 \div 0,04$ , где  $d$  — диаметр канала или сопла, из которого вытекает струя). Это, в свою очередь, налагает определенные условия на размер сжигающих устройств при оптимизации процесса горения метана.

На рис. 3, 2 представлен график зависимости концентраций окислов азота от  $v'$ . Как видно из графика, с ростом пульсационной скорости существенно увеличивается содержание окислов азота. Эта тенденция проявлялась и ранее при исследовании диффузионных пламен водорода, что связано с таким смещением конкурирующих реакций в зонах горения, при котором роль реакций синтеза окислов азота увеличивается.

Представляет интерес динамика образования окислов азота при изменении соотношений начальных концентраций исходных компонентов в зонах горения смешивающихся струй топлива и воздуха. При увеличении отношения  $[\text{CH}_4]_0/[\text{O}_2]_0$  в зонах горения выше стехиометрического, т. е. более 0,55, существенно уменьшается концентрация окислов азота в конце факела. Появляется возможность повысить уровень турбулентности в диффузионном факеле. Это согласуется с известными экспериментальными фактами, а сам способ сжигания обогащенной смеси в предкамере лежит в основе двухкамерного способа сжигания топлив.

Реакции синтеза окислов азота, как это следует из расчетов, идут с запаздыванием по сравнению с основными реакциями горения. Как те, так и другие реакции зависят от концентрации компонентов, которые, в свою очередь, зависят от давления. Расчеты показали, что с ростом давления от 2 до 10 ата при сохранении отдельных параметров постоянными в конце факела существенно увеличивается концентрация окислов азота, особенно NO<sub>2</sub>, хотя время горения уменьшается. В табл. 2 приведены сравнительные результаты таких расчетов ( $\beta = 0,4 \cdot 10^5$  1/с,  $\delta_0 = 1$ ,  $T_0 = 1600$  К) при одинаковой полноте выгорания  $\eta = 0,94$ . По мере завершения процесса ( $\eta = 0,98$ ) концентрации NO и NO<sub>2</sub> увеличиваются и составляют вместе  $13,89 \cdot 10^{-10}$  моль/см<sup>3</sup>. Пересчет на нормальные условия дает величину приблизительно 0,07 г/м<sup>3</sup>, что близко к экспериментально измеренным значениям в конце диффузионного факела при горении газобразных углеводородных топлив [9, 10].

Проведенные расчеты показали, что имеется весьма существенный рычаг, позволяющий управлять процессом горения метана с образованием минимально возможных концентраций окислов азота. Полученные в работе зависимости требуют в дальнейшем экспериментальной проверки и уточнения.

Поступила в редакцию 24/V 1983

## ЛИТЕРАТУРА

1. Р. С. Тюльпанов, С. А. Михальчук. ФГВ, 1981, 17, 2.
2. В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин. Химические процессы в газах. М.: Наука, 1981.
3. V. N. Kondratiev. X-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburg, 1965.
4. D. B. Olson, W. C. Gardiner, Jr. J. Phys. Chem., 1977, 81, 25.
5. В. Я. Басевич, С. М. Когарко. Изв. АН СССР. Сер. хим., 1979, 6, 1404.
6. T. Tsuboi. Japan. J. Appl. Phys., 1976, 15, 159.
7. Г. С. Аравин и др. ФГВ, 1982, 18, 1.
8. В. Н. Кондратьев. Константы скорости газофазных реакций. Справочник. М.: Наука, 1971.
9. Р. С. Тюльпанов. Диффузионные турбулентные пламена. Л.: ЛГУ, 1981.
10. Теория и практика сжигания газа/Под ред. А. С. Иссерлипа и М. И. Певзнера. Л.: Недра, 1981.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИТНОГО ПОРОХА

*Ю. С. Иващенко, В. М. Зенченко, В. Л. Павленко, А. Л. Садырин  
(Красноярск)*

Процесс горения углеводородных топлив сопровождается химической ионизацией, отражающей интенсивность реакций горения [1]. В работе [2] предполагается, что реакции химионизации могут влиять на концентрацию активных частиц в зоне горения. Поскольку цепные реакции горения и реакции химической ионизации совмещены в пространстве и во времени, последняя может оказывать влияние на процесс горения.

До сих пор неравновесная ионизация наиболее широко исследовалась при горении газообразных углеводородных топлив. Поэтому представляет интерес изучение химионизации при горении конденсированных систем. Известно [3], что неравновесная ионизация газовой фазы сопровождается процессом горения твердых топлив. В работе [4] говорится о существовании ранней (по сравнению с основным приращением температуры) ионизации в порах поверхностного слоя твердого топлива.

Для изучения взаимосвязи между процессом горения и уровнем химической ионизации у поверхности исследовали горение баллиститного пороха Н, содержащего добавку 1% окиси свинца. Измеряли распределение электропроводности газа от поверхности горения вдоль оси пламени. Измерения проводили на переменном токе частотой 4 кГц с помощью электрического зонда. Зонд представлял собой два вольфрамовых электрода диаметром от 20 до 100 мкм, заклеиваемых в образец. Расстояние между электродами 3 мм. Образцы прямоугольного сечения имели размер  $7 \times 10 \times 50$  мм. Электроды заклеивали параллельно малой грани на расстоянии 10 мм от плоскости воспламенения. Для обеспечения торцевого горения образцы покрывали слоем парафина. После этого образец и электроды фиксировали в контактной пробке прибора постоянного давления.

При сгорании образца зонд, оставаясь неподвижным, последовательно проходил через поверхность горения и газовую фазу, примыкающую к ней. Малый диаметр электродов обеспечивал их быстрый прогрев. Тем самым исключалось влияние пограничных слоев охлажденного газа на электродах на результаты измерений. Для расширения динамического диапазона схема измерений включала логарифмический усилитель. Один из электродов зонда был заземлен. Постоянная времени измерений составляла  $2 \cdot 10^{-3}$  с.

На рис. 1 дан характерный вид осциллограммы электропроводности (2) при давлении 5 МПа. На ней имеется также запись температуры (1), полученная с помощью вольфрам-рениевой термопары, сваренной встык и выполняющей одновременно роль активного электрода зонда. Из осциллограммы видно, что вблизи поверхности существует зона ионизации,