

7. E. J. Kansa. J. Comp. Phys., 1981, 42, 152.
8. P. A. Libby, T. R. Blake. Comb. Flame, 1979, 36, 139.
9. P. A. Libby, T. R. Blake. Comb. Flame, 1981, 41, 123.
10. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/Под ред. акад. В. П. Глушко. М.: Наука, 1982.
11. Основы практической теории горения/Под ред. В. В. Померанцева. Л.: Энергия, 1973.
12. Л. Е. Стернин. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974.
13. Л. Е. Стернин и др. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1980.
14. S. C. Hunter, S. S. Chevy, J. R. Kligel. AIAA Paper, № 2041, 1981.
15. В. М. Хайлов. Химическая релаксация в соплах реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1975.
16. D. L. Baulch et al. Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions. Vol. I—III. London, 1972—1976.
17. M. C. Lin, S. H. Bauer. J. Chem. Phys., 1969, 50, 8, 3377.
18. G. Dixon-Lewis, D. J. Williams.— In: Comprehensive Chemical Kinetics. Vol. 17. Amsterdam, 1977.
19. C. W. Gear. Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations. N. Y., 1971.
20. А. Ю. Захаров, В. Н. Турчанинов. STIFF-программа для решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Препринт ИПМ АН СССР, 1977, № 5.
21. W. H. Enright. ACM Transaction of Mathematical Software, 1978, 4, 127.
22. L. F. Shampine. J. of Computational Phys., 1984, 54, 1, 74.
23. J. M. White. Science, 1982, 218, 4571, 429.
24. J. C. Tully. J. Chem. Phys., 1980, 73, 12, 6333.

*Поступила в редакцию 6/II 1985,
после доработки — 22/VII 1985*

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ КИНЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ВОДОРОДА И МЕТАНА

*В. Я. Басевич, В. П. Володин, С. М. Когарко, Н. И. Перегудов
(Москва)*

Химические реакции в зоне горения пламени определяют скорость, величину энергосвечения и состав выбрасываемых продуктов, в том числе экологически вредных (NO, CO, углеводороды). Между тем как в теоретическом, так и в экспериментальном плане вопрос о влиянии турбулентности на протекание реакций в пламени остается нерешенным [1]. Увеличенный перенос тепла и вещества из-за турбулентности должен снижать максимумы и градиенты концентраций промежуточных продуктов, включая активные центры реакции, но одновременно могут создаваться оптимальные условия для протекания реакции по соотношению компонентов и температуре.

Численный анализ химической кинетики с помощью системы уравнений для мгновенных параметров горения со статистическим моделированием турбулентного поля скоростей, в принципе, позволяет подойти к решению рассматриваемого вопроса. Однако применение сложного кинетического механизма даже в двумерном приближении [2] (не говоря о трехмерном) потребовало бы чрезмерных затрат машинного времени. Поэтому кинетические расчеты ниже производятся на основе одномерного подхода [3, 4]. При всей своей ограниченности он обладает важным преимуществом — возможностью описания реального сложного химического процесса в турбулентной среде без введения каких-либо эмпирических соотношений.

В простейшей постановке квазистационарные уравнения баланса энергии и вещества при пренебрежении средним движением в приближе-

нии одномерной турбулентности имеют вид

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial (cT)}{\partial t} &= \sum_{ij} h_{ij} W_{ij} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho \frac{\partial (cTu)}{\partial x}, \\ \rho_0 \frac{\partial \left(\frac{n_j}{\rho} \right)}{\partial t} &= \sum_j W_{ij} + \frac{\partial}{\partial x} D_j \rho \frac{\partial \left(\frac{n_j}{\rho} \right)}{\partial x} - \rho \frac{\partial \left(u \frac{n_j}{\rho} \right)}{\partial x}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ_0 и ρ — начальная и текущие плотности; T — температура; c — теплоемкость; t — время; λ — коэффициент молекулярной теплопроводности; x — координата; n_j и D_j — концентрация и коэффициент молекулярной диффузии j -го компонента химической реакции; W_{ij} и h_{ij} — i -я скорость и тепловой эффект реакции в элементарном акте с участием j -го компонента; u — проекция мгновенной пульсационной скорости на ось координат x .

В основу рассматриваемой схемы процесса положено гомогенное горение со струйной стабилизацией пламени (рис. 1). Струя газа с высокой температурой, содержащая активные центры, вытекает по центральному каналу и смешивается со свежей горючей смесью, поступающей по периферии. В зоне смешения начинаются химические реакции горения, распространяющиеся по всему сечению. Начальные и граничные условия:

$$t = 0: \quad n_j = (n_j)_0, \quad T = T_0 \text{ для } x = 0 \div x_1, \quad x_2 \div x_3;$$

$$n_j = (n_j)_1, \quad T = T_1 \text{ для } x = x_1 \div x_2;$$

$$x = 0, x_3: \quad \rho \partial (cTu) / \partial x = \rho \partial (un_j / \rho) / \partial x = 0.$$

Значения мгновенной пульсационной скорости $u(x, t)$ получаются моделированием ее возможной случайной величины для заданных характеристик турбулентности — среднеквадратичной пульсационной скорости $\bar{u}$, пространственного интегрального масштаба Эйлера L и временного интегрального масштаба Лагранжа τ , одинаковых для всех x и t . Скорости находятся в m точках, случайно расположенных на оси x , а их значения между ними определяются линейной интерполяцией.

Каждое решение соответствует возможной индивидуальной реализации мгновенных значений T и n_j в поле пульсационных скоростей $u(x, t)$. При необходимости имеется возможность усреднения по любому числу решений.

С точки зрения физики решение уравнений описывает процесс распространения зоны реакции в направлении нормали к поверхности пламени со скоростью $u_{нт}$. Последняя находилась как скорость движения точки профиля со средней температурой $T_{ср}$, а ширина зоны реакции $\delta_{нт}$ — условно как удвоенная проекция на координатную ось отрезка касательной с максимальным градиентом к температурному профилю между точками T_0 и T_1 . Между $u_{нт}$ и обычно наблюдаемыми скоростями распространения пламени в турбулентном потоке u_t существует зависимость

$$u_t = u_{нт} F_n / F,$$

где F_n и F — площади мгновенной поверхности горения, искривленной турбулентными пульсациями, и условной «средней» поверхности полупревращения исходного горючего вещества.

Расчеты проводились применительно к условиям горения воздушных смесей водорода и метана при пониженном давлении. Схема реакций, на основе которой составлялись члены $\sum W_{ij}$ и $\sum h_{ij} W_{ij}$ в системе (1), соответствует более общему механизму, использовавшемуся ранее в [5]. На основе предварительных оценок в данных расчетах использованы только те процессы, которые при конкретных расчетных условиях вносят в реак-



Рис. 1.

Таблица 1

Механизм горения водорода (1—9) и метана (1—35)

Номер	Реакция	Прямая			Обратная	
		A	E	h	A ₋	E ₋
1	$\text{OH} + \text{H}_2 = \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$2,4 \cdot 10^{10}$	5,2	15	$1,14 \cdot 10^{11}$	20,4
2	$\text{OH} + \text{O} = \text{O}_2 + \text{H}$	$5,1 \cdot 10^9$	0	17	$7,8 \cdot 10^{10}$	15,9
3	$\text{OH} + \text{H} = \text{O} + \text{H}_2$	$6,9 \cdot 10^9$	7	2	$1,5 \cdot 10^{10}$	8,9
4	$\text{OH} + \text{OH} = \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$1,44 \cdot 10^{10}$	0	17	$1,51 \cdot 10^{11}$	17
5	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{HO}_2 + \text{M}$	$4,14 \cdot 10^9$	0	47	$5,7 \cdot 10^{12}$	48,8
6	$\text{H} + \text{HO}_2 = \text{OH} + \text{OH}$	$2 \cdot 10^{10}$	0	37	$1,62 \cdot 10^9$	37,6
7	$\text{O} + \text{HO}_2 = \text{O}_2 + \text{OH}$	$6 \cdot 10^{10}$	0	54	$9,43 \cdot 10^{10}$	54
8	$\text{OH} + \text{OH} + \text{M} = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{M}$	$1,9 \cdot 10^9$	0	50	$4,07 \cdot 10^{13}$	42
9	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,4 \cdot 10^{10}$	1,5	40	$3,67 \cdot 10^{11}$	41,8
10	$\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$	$2 \cdot 10^9$	5,7	52	$1,12 \cdot 10^{12}$	30,4
11	$\text{CO} + \text{HO}_2 = \text{CO}_2 + \text{OH}$	$1,33 \cdot 10^{11}$	23	62	$4,26 \cdot 10^{12}$	85
12	$\text{OH} + \text{H}_2\text{CO} = \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$	$3,6 \cdot 10^{11}$	1,5	45	$1 \cdot 10^{11}$	26,4
13	$\text{H} + \text{H}_2\text{CO} = \text{HCO} + \text{H}_2$	$6 \cdot 10^{10}$	1,5	30	$3,7 \cdot 10^9$	31
14	$\text{O} + \text{H}_2\text{CO} = \text{HCO} + \text{OH}$	$8,4 \cdot 10^{11}$	5,5	28	$2,3 \cdot 10^{10}$	33,4
15	$\text{H} + \text{CO} + \text{M} = \text{HCO} + \text{M}$	$8 \cdot 10^9$	0	30	$1,6 \cdot 10^{11}$	14,7
16	$\text{HCO} + \text{O}_2 = \text{CO} + \text{HO}_2$	$6 \cdot 10^{10}$	7,3	17	$5,5 \cdot 10^{10}$	24,4
17	$\text{HCO} + \text{H} + \text{M} = \text{H}_2\text{CO} + \text{M}$	$6,3 \cdot 10^8$	-3,2	73	$5 \cdot 10^{13}$	72
18	$\text{HCO} + \text{OH} = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	$6 \cdot 10^{10}$	0	88	$8,9 \cdot 10^{11}$	88
19	$\text{CH}_4 + \text{OH} = \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$6 \cdot 10^{10}$	8,5	17	$6,9 \cdot 10^9$	24,8
20	$\text{CH}_4 + \text{H} = \text{CH}_3 + \text{H}_2$	$2 \cdot 10^{11}$	11,2	2	$4,8 \cdot 10^9$	12,5
21	$\text{CH}_4 + \text{O} = \text{CH}_3 + \text{OH}$	$2,05 \cdot 10^{10}$	7,8	0	$2,2 \cdot 10^8$	7
22	$\text{CH}_4 + \text{O} = \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$2,05 \cdot 10^{10}$	7,8	34	$8,3 \cdot 10^8$	41,8
23	$\text{CH}_3 + \text{HO}_2 = \text{CH}_4 + \text{O}_2$	$4,3 \cdot 10^8$	-0,4	54	$6 \cdot 10^{10}$	55
24	$\text{CH}_3 + \text{H} + \text{M} = \text{CH}_4 + \text{M}$	$5,9 \cdot 10^{10}$	0	101	$2 \cdot 10^{14}$	88
25	$\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{CH}_4 + \text{HO}_2$	$6,5 \cdot 10^7$	4,3	14	$6,06 \cdot 10^8$	19
26	$\text{CH}_3 + \text{OH} = \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$6 \cdot 10^9$	2,8	34	$2,2 \cdot 10^{10}$	37,2
27	$\text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO} + \text{H}$	$6 \cdot 10^9$	2,5	36	$7,4 \cdot 10^{10}$	38,2
28	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 = \text{CO} + \text{OH} + \text{H}$	$6 \cdot 10^9$	3,5	32	$3,3 \cdot 10^5$	33,8
29	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 = \text{H}_2\text{CO} + \text{OH}$	$3 \cdot 10^{10}$	10	51	$3,3 \cdot 10^{10}$	61,6
30	$\text{CH}_3 + \text{O} = \text{H}_2\text{CO} + \text{H}$	$1,86 \cdot 10^{10}$	0	68	$3,8 \cdot 10^{11}$	68,2
31	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H} + \text{H}$	$1,8 \cdot 10^8$	0	57	$4 \cdot 10^7$	54,8
32	$\text{N} + \text{NO} = \text{N}_2 + \text{O}$	$2,75 \cdot 10^{10}$	0,5	75	$5 \cdot 10^{10}$	75
33	$\text{N} + \text{O}_2 = \text{NO} + \text{O}$	$1 \cdot 10^{10}$	7,5	32	$2 \cdot 10^9$	39,4
34	$\text{NO} + \text{NO} = \text{N}_2 + \text{O}_2$	$1,41 \cdot 10^{12}$	85	43	$2,85 \cdot 10^{13}$	128
35	$\text{N} + \text{OH} = \text{NO} + \text{H}$	$4 \cdot 10^{10}$	0	98	$1,5 \cdot 10^{11}$	48,6

Примечание. A—предэкспонент, л, моль, с; E—энергия активации, ккал/моль; h—тепловой эффект, ккал/моль. Константы скорости процессов 2, 8, 15, 24, имеющих «отрицательную» энергию активации, приближенно были приняты не зависящими от температуры и соответствующими их значениям при $T_a = 1920$ К.

цию горения существенный вклад (табл. 1). В механизме фигурируют 18 частиц (O_2 , H_2 , OH , H , O , HO_2 , H_2O , H_2O_2 , CH_4 , CH_3 , CH_2 , H_2CO , HCO , CO , CO_2 , N_2 , NO , N), участвующих в 35 реакциях, протекающих в прямом и обратном направлении.

Принято, что $\lambda = \lambda_*(T/T_*)^{0,7}$, $\lambda_* = 6,25 \cdot 10^{-5}$ кал/(см·с·град), $\rho = \rho_*(T_*/T)(p/p_*)$, $\rho_* = 4,16 \cdot 10^{-5}$ моль/см³, $D_j = D_{*j}(p_*/p) \cdot (T/T_*)^{1,7}$, где p —давление, индекс * соответствует нормальным условиям ($p_* = 103$ кПа, $T_* = 293$ К). Значения коэффициентов диффузии D_{*j} взяты по справочным данным или приближенно оценены:

j	$D_{*j}, \text{см}^2/\text{с}$	j	$D_{*j}, \text{см}^2/\text{с}$	j	$D_{*j}, \text{см}^2/\text{с}$
ОН	0,32	H ₂ O ₂	0,22	CO ₂	0,24
H	1,06	O ₂	0,27	H ₂ CO	0,23
O	0,34	N	0,35	CH ₄	0,27
HO ₂	0,22	NO	0,20	CH ₃	0,35
H ₂	0,79	N ₂	0,21	CH ₂	0,36
H ₂ O	0,40	CO	0,26	HCO	0,23

Теплоемкость вычислялась по формуле $c = c_* + c_{**}T$, где $c_* = 7 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{град})$, $c_{**} = 10^{-5} \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{град}^2)$. Принималось, что $L = 4,2 \text{ см}$, $\tau = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, $m = 20$. Ширина камеры сгорания $x_s = 6 \text{ см}$, длина 30 см, что при средней скорости 30 м/с соответствует времени горения 10 мс.

Результаты расчетов

В соответствии с поставленной задачей находились решения $T(x, t)$ и $n_i(x, t)$ для воздушных смесей водорода и метана при вариации значений одного из параметров турбулентности — среднеквадратичной пульсационной скорости $\bar{u}$. Усреднений по ряду реализаций не производилось из-за больших затрат машинного времени, тем более, что исследуемые зависимости обнаруживаются даже в индивидуальных реализациях.

Результаты расчетов оказываются различными в зависимости от типа топлива и температуры стабилизирующей струи T_1 (во всех расчетах вещество струи — воздух, содержащий атомы кислорода в концентрации 0,05%). С увеличением $\bar{u}$ и при сохранении точности расчетов затраты машинного времени растут и тем больше, чем сложнее кинетическая схема реакций. Поэтому для водородно-воздушного пламени, где используется только часть схемы табл. 1, расчеты проведены до $\bar{u} = 190 \text{ см/с}$, а для метано-воздушного пламени — до $\bar{u} = 90 \text{ см/с}$.

Водородно-воздушное пламя. Расчеты проводили для содержания водорода в смеси 8,5 и 17,5% и $p = 0,5 \text{ ата}$. Рассматривались два случая:

1) температура стабилизирующей струи больше адиабатической температуры (T_a) пламени, $T_1 > T_a$.

Для $T_1 = 1823 \text{ К}$, $[\text{H}_2]_0 = 8,5\%$ ($T_a = 980 \text{ К}$) и среднеквадратичной пульсационной скорости $\bar{u} = 45$ и 190 см/с получаются $u_{\text{нр}} = 19$ и $36,4 \text{ см/с}$, а $\delta_{\text{нр}} = 0,65$ и $0,71 \text{ см}$ соответственно (табл. 2, варианты 1—3). В табл. 2 представлены максимальные концентрации главных активных центров реакции ОН, Н и О, соответствующие конечному расчетному времени 10 мс (положения максимумов по оси x не совпадают). На рис. 2 представлены вычисленные концентрации ОН, Н и О в волне горения, перемещающейся от оси ($x = 3 \text{ см}$) к периферии (вариант 1, время 10 мс). Из таблицы видно, что концентрации атомов О, Н и гидроксила больше при меньшей интенсивности турбулентности. Локальная скорость реакции горения меняется по координате x и может характеризоваться ее максимальной величиной W_{max} в каждый момент времени. Последняя подсчитывалась как скорость расходования водорода на основе табл. 1 с учетом вклада только главных членов уравнения скорости, соответствующих элементарным процессам (1) и (—3):

$$W = k_1[\text{OH}_2][\text{H}_2] + k_{-3}[\text{O}][\text{H}_2],$$

где k_1 и k_{-3} — константы скоростей указанных процессов.

Оказывается, что W_{max} также больше при малой интенсивности турбулентности. Результаты расчетов $W(x)$ для $t = 10 \text{ мс}$ представлены на рис. 2 и в табл. 2, где указаны средние значения по двум максимумам, слева и справа от оси камеры сгорания. Здесь же показана ве-

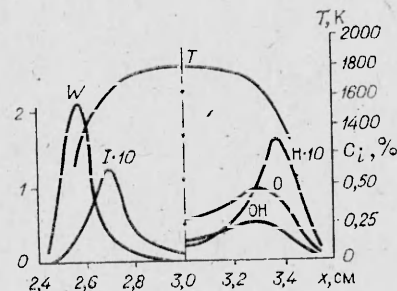


Рис. 2.

Таблица 2

Условия и результаты расчетов

Номер варианта	% [H ₂]	% [CO]	T _а , K	T _г , K	p, атм	$\bar{u}$, см/с	$u_{лт}$, см/с	$\delta_{гг}$, см	Максимальные концентрации, %						I, отн.ед.	W _{max} , мсл/(г·с)
									OH	H	O	NO*	CO	H ₂		
1	8,5	—	980	1823	0,5	45	19	0,65	0,274	0,081	0,511	—	—	—	0,126	1,55
2	8,5	—	980	1823	0,5	100	26,4	0,69	0,227	0,078	0,375	—	—	—	0,126	1,48
3	8,5	—	980	1823	0,5	190	36,4	0,71	0,179	0,074	0,264	—	—	—	0,0724	0,93
4	8,5	—	980	1823	0,5	45	6,7	0,53	0,020	0,078	0,122	—	—	—	0,0344	0,485
5	8,5	—	980	980	0,5	190	42,5	0,84	0,054	0,119	0,195	—	—	—	0,0845	0,846
6	17,5	—	1640	1640	0,5	45	28,5	0,43	0,335	0,57	0,32	0,27	—	—	0,66	5,55
7	17,5	—	1640	1640	0,5	190	66,5	0,58	0,410	1,28	0,56	0,40	—	—	2,6	10,63
8	—	7,5	1920	1920	0,25	22,5	8,9	0,79	0,496	0,638	1,46	2,60	2,94	0,203	—	0,40
9	—	7,5	1920	1920	0,25	90	15,9	0,96	0,462	0,610	1,36	2,24	3,07	0,218	—	0,49

* Указаны объемные доли, $\times 10^4$.

личина произведения концентраций $I = [O] \cdot [H]$, приблизительно пропорциональная интенсивности излучения гидроксила [6]: на рис. 2 — $I(x)$, в табл. 2 — также среднее значение по двум максимумам.

2) $T_1 = T_a$. Расчеты проводили для $[H_2]_0 = 8,5$ и $17,5\%$ (см. табл. 2, варианты 4—7). В этом случае турбулентность среды оказывает на концентрации главных активных центров реакции, свечение и скорость реакции горения водорода обратное действие: в интервале $\bar{u} = 45 \div 190$ см/с они возрастают с увеличением интенсивности турбулентности. При повышении турбулентности растет и количество образующейся окиси азота в вариантах 6 и 7.

Расчеты для метано-воздушных пламен проведены для $[CH_4]_0 = 7,5\%$ и $p = 0,25$ ата. Рассматривался только случай $T_1 = T_a$. В этих условиях увеличение интенсивности турбулентности приводит к снижению концентрации главных активных центров реакции. Скорость реакции горения, которую можно определить по уравнению, учитывающему вклад только основных элементарных процессов расходования метана (19) — (22)

$$W = k_{19} [OH] \cdot [CH_4] + k_{20} [H] \cdot [CH_4] + (k_{21} + k_{22}) [O] \cdot [CH_4],$$

где k_{19} , k_{20} , k_{21} и k_{22} — константы скоростей соответствующих реакций, с увеличением турбулентности в указанном диапазоне возрастает.

Таким образом, для метана в случае $T_1 = T_a$ с ростом интенсивности турбулентности концентрация активных центров реакции падает, а не увеличивается, как это имеет место для водорода. Одновременно уменьшается образование окиси азота.

Гидроксил по реакциям (1) и (10) (см. табл. 1) способствует превращению H_2 в H_2O и CO в CO_2 . Поэтому при меньших концентрациях OH максимумы водорода и окиси углерода в зоне реакции получают выше и их больше остается в продуктах сгорания.

Обсуждение результатов

Повышение $u_{лт}$ с увеличением $\bar{u}$, сопровождающееся небольшим

уширением зоны реакции $\delta_{\text{лт}}$, приблизительно соответствует имеющимся опытным данным по водороду [3]. Аналогичные сведения по метану практически отсутствуют. Судя по небольшой величине $\delta_{\text{лт}}$, расчеты подтверждают известную поверхностную модель турбулентного пламени, уже имеющую многочисленные экспериментальные обоснования. Возможно, что при больших $\bar{u}$ зона реакции заметно расширилась бы, если не наступал срыв горения. В общем увеличение турбулентности приводит к повышению $u_{\text{лт}}$ (и, очевидно, u_t), более быстрому охвату смеси горением и возрастанию средней скорости энерговыделения.

Одновременно наблюдаются сдвиги в кинетике. Следует отметить изменение концентраций активных центров при вариации интенсивности турбулентности среды. Эти результаты можно попятить, если принять во внимание увеличивающийся тепло- и массоперенос с ростом пульсационной скорости. Направление изменения концентрации активных центров реакции и сама величина изменения зависят от конкретных обстоятельств.

Рассмотрим сначала горение водорода. В случае $T_1 > T_a$, моделирующем организацию процесса с активным стабилизатором, из-за снижения температуры в зоне реакции за стабилизатором концентрация главных активных центров уменьшается и тем быстрее, чем выше уровень турбулентности, что является основной причиной снижения максимума скорости реакции горения. После истечения достаточного времени, удаления от стабилизатора и выравнивания максимальной температуры до уровня адиабатической дальнейшие закономерности соответствуют $T_1 = T_a$.

Случай $T_1 = T_a$ — более распространенный, отвечающий обычным условиям стабилизации (плохообтекаемое тело, пилотная горелка с малым расходом). Здесь нет повышенной температуры на оси камеры и главное значение приобретает увеличивающийся обмен по мере роста турбулентности среды. Действительно, тепло и главные активные центры реакции, атомы О, Н и гидроксил ОН с увеличенной скоростью движутся к свежей смеси, обеспечивая тем самым более высокие значения W и I . Факт роста интенсивности выхода света на единицу прореагировавшего топлива с повышением интенсивности турбулентности известен [7] и соответствует результатам расчета по влиянию $\bar{u}$ на I . В соответствии с большей концентрацией атомов О образуется и большее количество NO.

При горении метана ($T_1 = T_a$) расчеты концентраций активных центров дают обратную картину. Это различие между поведением водорода и метана качественно можно объяснить следующим. В обоих случаях главный процесс разветвления цепной реакции связан с водородом (реакции (-2) , (-3) и важный акт продолжения цепи (1)) и наиболее интенсивно протекает там, где имеется H_2 и промежуточные продукты реакции Н, О, и ОН. В водородной смеси они разделены, поэтому обмен способствует процессу разветвления. При горении метана в свежей смеси водорода нет, он образуется там же, где идет реакция, и увеличение отвода активных центров из-за турбулентности не компенсируется одновременным разветвлением цепей. При этом концентрация активных центров падает, хотя максимум скорости реакции даже несколько увеличивается за счет повышения локальной концентрации метана. Опыт показывает, что при горении метана имеет место уменьшение интенсивности выхода света на единицу прореагировавшего топлива с ростом турбулентности [7, 8]. У метана выход света связан со свечением возбужденных радикалов C_2^* и CH^* , однако можно предположить, что содержание последних, как и других радикалов, изменяется симбатно с концентрацией главных активных центров. В опытах [9, 10] обнаружены спад [О], окиси [NO] и увеличение [CO] и $[H_2]$ с ростом интенсивности турбулентности. Расчеты качественно соответствуют этим результатам, включая абсолютный уровень концентраций всех указанных частиц.

Относительно окиси азота следует иметь в виду, что в схеме табл. 1 (реакции $(32) - (35)$) записано образование так называемой термической окиси азота с главными процессами из [11]. Вклад этих процессов

из-за относительно низких температур и малых времен, при которых производились расчеты, невелик. Это видно по величине полученных концентраций NO. Реально в таких условиях, по-видимому, несколько больший вклад дают процессы образования «быстрой» NO, где важны реакции CN и CH_2 с N_2 , количественная кинетика которых еще недостаточно изучена. Однако из сказанного выше следует, что образование «быстрой» NO также должно уменьшаться в случае, если снижается концентрация OH, H и O.

Согласно [12], при больших пульсационных скоростях ($u = 300 \div 600$ см/с) обнаруживается тенденция к замедлению реакции в турбулентных пламенах и их угасанию. Представляется, что снижение содержания главных активных центров в турбулентном пламени, обнаруживаемое у метана в расчетах и опытах при небольших интенсивностях турбулентности, является началом проявления этой тенденции. Можно думать, что у водорода такого рода процессы начинают проявляться позднее — при больших значениях u . Выравнивание и спад турбулентной скорости пламени при высоких u проявляются при расчетах в двумерном приближении [2].

Общее согласие экспериментальных и теоретических данных позволяет заключить, что предлагаемый метод моделирования химических реакций при турбулентном горении оправдывает себя, по крайней мере, качественно. При увеличении быстродействия ЭВМ, оп, по-видимому, может быть применен для практических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турбулентные течения реагирующих газов/Под ред. П. А. Либби, Ф. А. Вильямса. М.: Мир, 1983.
2. В. Я. Басевич, В. П. Володин, С. М. Когарко и др. Хим. физика, 1982, 1, 8, 1130.
3. В. Я. Басевич, В. П. Володин, С. М. Когарко и др. ФГВ, 1978, 14, 5, 48.
4. В. Я. Басевич, В. П. Володин, С. М. Когарко и др. ФГВ, 1980, 16, 4, 7.
5. С. М. Когарко, В. Я. Басевич. ФГВ, 1981, 17, 5, 3.
6. А. Гейдон, Х. Вольфгард. Пламя, его структура, излучение и температура. М.: Металлургия, 1959.
7. С. М. Когарко, В. Я. Басевич. ЖФХ, 1961, 35, 8, 1794.
8. M. Summerfield, S. H. Reiter et al. Jet Propulsion, 1955, 25, 377.
9. В. Я. Басевич, С. М. Когарко, В. Ю. Пашков и др. Хим. физика, 1982, 1, 11, 1557.
10. В. Я. Басевич, С. М. Когарко, А. Шахбазян. Хим. физика, 1984, 3, 12.
11. Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. Окисление азота при горении. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1947.
12. В. П. Карпов, Е. С. Северин. ФГВ, 1980, 16, 1, 45.

Поступила в редакцию 13/XI 1984

ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ И ТЕМПЕРАТУР ПРИ ГОРЕНИИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ГАЗА В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ

В. С. Бабкин, С. С. Минаев, П. К. Сеначин, В. В. Замащиков

(Новосибирск, Барнаул)

Нестационарное распространение пламени в закрытом сосуде порождает сложное распределение скоростей и температур в свежем газе и продуктах сгорания [1, 2]. При вращении газа даже в самом простом случае вращения с постоянной угловой скоростью появляются дополнительные силы — инерционная и кориолисова, которые должны привести к существенной перестройке течений, в частности, к появлению распределения угловых скоростей по радиусу сосуда. Выяснение термо- и газодинамических особенностей течений в закрытом сосуде, обусловленных вращением газа, есть цель настоящей работы. Информация по этим вопросам может быть использована при решении таких, например, проблем, как гашение пламени в поле массовых сил [3], сжигание газа во вращающихся потоках [4] и др.