

БАЗА ДАННЫХ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЛАМИНАРНОГО ГОРЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ  
МЕТАНА И ВОДОРОДА В ПРИСУТСТВИИ  
ПАРОВ ВОДЫ

А. А. Беляев, В. Я. Басевич, С. М. Фролов, Ф. С. Фролов

ИХФ РАН  
г. Москва, Россия

В настоящее время в связи с повышением требований к энергетическим установкам по энергосбережению и экологическим показателям предлагается целый ряд практических мер, направленных на совершенствование рабочего процесса и использование альтернативных горючих. В частности, для стационарных газотурбинных установок (ГТУ) в качестве горючего предлагают использовать смеси природного газа с водородом и водяным паром. В связи с этим важно уметь прогнозировать параметры процесса горения и эмиссионные характеристики энергетических установок в широком диапазоне условий, реализующихся в камерах сгорания.

В ИХФ РАН недавно разработан эффективный алгоритм многомерного численного моделирования турбулентного горения газов, который позволяет одновременно рассматривать фронтальные и объемные химические реакции в турбулентном газовом потоке и оптимизировать геометрические и режимные параметры камер сгорания [1]. Важную роль в реализации алгоритма играют базы данных для характеристик ламинарного горения смесей различных горючих при разных начальных температурах, давлениях и составах.

Цель данной работы — создание базы данных для характеристик ламинарного горения гомогенных воздушных смесей метана и водорода с добавлением паров воды. Для этого численно решали задачу о структуре плоского ламинарного пламени с использованием проверенного кинетического механизма. Вычислительная программа позволяла определить скорость стационарного распространения пламени  $u_n$ , а также пространственные распределения

температуры и концентраций всех химических компонентов в зоне горения [2].

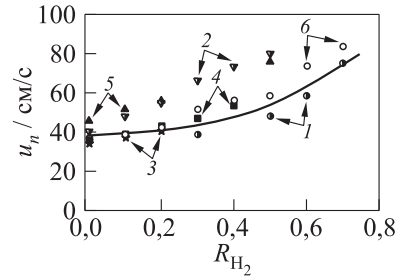
В результате решения задачи определяли следующие характеристики:

- нормальную скорость пламени  $u_n$ ;
- мольную долю «быстрого» оксида азота  $X_{\text{NO}}$  в пламени;
- мольную долю кислорода  $X_{\text{O}_2}$  в продуктах горения равновесного состава;
- максимальную мольную долю оксида углерода  $(X_{\text{CO}})_{\text{max}}$  в пламени;
- мольную долю сажи  $X_{\text{C}}$  в пламени.

В расчетах применяли глобальный кинетический механизм окисления метана, предложенный авторами ранее [3–6]. Этот кинетический механизм учитывает образование «быстрого» NO, CO и сажи и может применяться в условиях высоких температур и давлений, а также в широком диапазоне изменения состава исходной смеси горючего с воздухом.

Для проверки кинетического механизма провели сравнение расчетов с имеющимися экспериментальными данными по горению смесей водорода и метана в воздухе в широком интервале изменения начального состава смеси, по горению таких смесей с добавками паров воды, а также сравнение с расчетами по детальному кинетическому механизму окисления метана. На рис. 1 представлены результаты сравнения расчетных значений скорости ламинарного пламени с экспериментальными данными [7–12] для смесей метан–водород–воздух стехиометрического состава с разным содержанием водорода при нормальных начальных условиях ( $p = 1$  атм и  $T_0 = 293$  К). По оси абсцисс отложен параметр  $R_{\text{H}_2} = X_{\text{H}_2}/(X_{\text{CH}_4} + X_{\text{H}_2})$ , характеризующий относительное содержание водорода в горючем. Этот рисунок демонстрирует существующие различия в имеющихся экспериментальных данных. Расчетная кривая в целом правильно описывает тенденцию возрастания скорости пламени с увеличением содержания водорода в горючем и укладывается в разброс экспериментальных точек.

Исследование характеристик горения смесей  $\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{воздух} - \text{пары воды}$  проводили при  $p$  от 1 до 40 атм,  $T_0$  от 293 до 800 К,  $R_{\text{H}_2} = 0, 0,1$  и  $0,2$ , начальном содержании паров воды  $(X_{\text{H}_2\text{O}})_0$  от 0



**Рис. 1** Зависимость скорости ламинарного пламени в смесях метан-водород-воздух стехиометрического состава от содержания водорода в горючем при  $T_0 = 293$  К и  $p = 1$  атм: кривая — расчет; значки — экспериментальные данные: 1 — [7], 2 — [8], 3 — [9], 4 — [10], 5 — [11], 6 — [12]

до 0,6 и коэффициенте избытка горючего  $\Phi = 0,7$  (бедная смесь), 1 (стехиометрический состав) и 1,5 (богатая смесь).

В качестве примера в табл. 1–3 приведены фрагменты базы данных для скорости ламинарного пламени (см. табл. 1),  $X_{NO}$  (см. табл. 2) и  $X_{CO}$  (см. табл. 3) при горении стехиометрической смеси

**Таблица 1** Расчетные данные для  $u_n$  (см/с) при  $\Phi = 1$  и  $(X_{H_2O})_0 = 0,2$

$T_0$ , К	$R_{H_2}$	$p$ , атм			
		1	3	10	40
293	0	15	9,7	5,7	3,0
	0,1	16	10	6,1	3,2
	0,2	16	10,5	6,3	3,3
450	0	36	24	14	7,5
	0,1	37	25	15	8,0
	0,2	38	26	16	8,3
600	0	73	49	30	16
	0,1	75	51	31	17
	0,2	77	54	33	18
800	0	167	114	69	37
	0,1	178	122	74	39
	0,2	192	131	79	42

**Таблица 2** Расчетные данные для  $X_{\text{NO}}$  (ppm) при  $\Phi = 1$  и  $(X_{\text{H}_2\text{O}})_0 = 0,2$

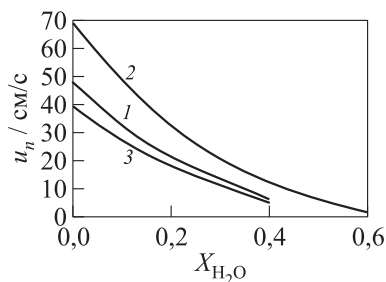
$T_0$ , К	$R_{\text{H}_2}$	$p$ , атм			
		1	3	10	40
293	0	17	17	17	17
	0,1	17	17	17	17
	0,2	16	16	16	16
450	0	17	17	17	17
	0,1	16	16	16	16,5
	0,2	16	15,5	15,5	16
600	0	16	16	16,5	18
	0,1	16	16	16	17,5
	0,2	15	15	15	17
800	0	16	16	16	21
	0,1	15	15	16	20,5
	0,2	14,5	14,5	15	20

**Таблица 3** Расчетные данные для  $(X_{\text{CO}})_{\text{max}}$  при  $\Phi = 1$  и  $(X_{\text{H}_2\text{O}})_0 = 0,2$

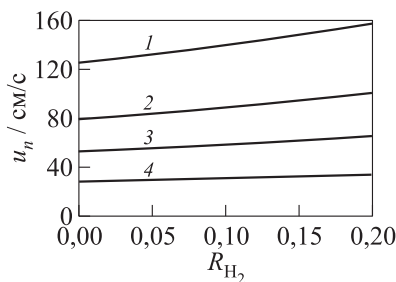
$T_0$ , К	$R_{\text{H}_2}$	$p$ , атм			
		1	3	10	40
293	0	0,0175	0,0167	0,0158	0,0143
	0,1	0,0172	0,0165	0,0157	0,0144
	0,2	0,0167	0,0162	0,0155	0,0142
450	0	0,0212	0,0205	0,0194	0,0178
	0,1	0,0208	0,0202	0,0193	0,0178
	0,2	0,0202	0,0197	0,0190	0,0176
600	0	0,0252	0,0244	0,0232	0,0215
	0,1	0,0246	0,0241	0,0231	0,0215
	0,2	0,0239	0,0237	0,0229	0,0213
800	0	0,0312	0,0303	0,0290	0,0271
	0,1	0,0310	0,0301	0,0290	0,0271
	0,2	0,0308	0,0301	0,0288	0,0270

$\text{CH}_4 - \text{H}_2$  – воздух – пары воды при  $(X_{\text{H}_2\text{O}})_0 = 0,2$ , разных давлениях, температурах и относительных содержаниях водорода в горючем.

Анализ результатов расчетов позволил сделать следующие выводы.

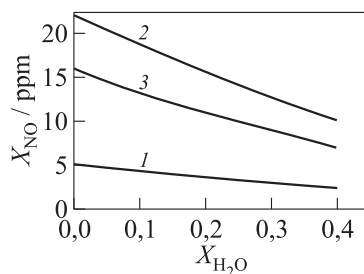


**Рис. 2** Расчетные зависимости скорости ламинарного пламени в смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{воздух} - \text{пары воды}$  от начального содержания паров воды  $(X_{\text{H}_2\text{O}})_0$  при  $R_{\text{H}_2} = 0,1$ ,  $p = 10$  атм,  $T_0 = 600$  К и разных значениях  $\Phi$ : 1 — 0,7; 2 — 1,0; 3 — 1,5



**Рис. 3** Расчетные зависимости скорости ламинарного пламени от содержания водорода в горючем при  $\Phi = 1,5$ ,  $X_{\text{H}_2} = 0,1$ ,  $T_0 = 800$  К и разных значениях давления: 1 — 1 атм; 2 — 3; 3 — 10; 4 — 40 атм

1. Добавление паров воды к метановоздушным и метановодородно-воздушным смесям снижает значение скорости ламинарного пламени (рис. 2).
2. По мере увеличения начальной концентрации водяного пара концентрационные пределы распространения ламинарного пламени сужаются.
3. Увеличение содержания водорода в горючем приводит к заметному росту  $u_n$  в богатых смесях (рис. 3).
4. Влияние добавок водорода на скорость пламени возрастает с увеличением начальной температуры и ослабевает с ростом давления.
5. В бедных и стехиометрических смесях увеличение  $R_{\text{H}_2}$  от 0 до 0,2 слабо влияет на скорость пламени.
6. Добавление водорода в горючее делает возможным распространение пламени даже при сильном разбавлении парами воды  $((X_{\text{H}_2\text{O}})_0 = 0,6)$ .
7. При  $R_{\text{H}_2} \leq 0,2$  скорость ламинарного пламени в смесях  $\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{воздух} - \text{пары воды}$  снижается с ростом давления.



**Рис. 4** Расчетные зависимости выхода «быстрого» оксида азота от начального содержания паров воды при  $R_{\text{H}_2} = 0,2$ ,  $p = 10$  атм,  $T_0 = 450$  К и разных  $\Phi$ : 1 — 0,7; 2 — 1; 3 — 1,5

8. С увеличением содержания паров воды выход «быстрого» NO заметно снижается (рис. 4). Влияние добавок  $\text{H}_2\text{O}$  особенно заметно для богатых и стехиометрических смесей.
9. Увеличение содержания водорода в горючем приводит к небольшому снижению выхода «быстрого» NO.
10. Концентрация «быстрого» NO очень слабо зависит от начальной температуры.
11. Заметного влияния давления на выход «быстрого» NO также не обнаружено.
12. С увеличением начальной концентрации водяного пара максимальная концентрация оксида углерода  $(X_{\text{CO}})_{\text{max}}$  снижается, причем наиболее сильно этот эффект проявляется для стехиометрических смесей.
13. С ростом начальной температуры значение  $(X_{\text{CO}})_{\text{max}}$  увеличивается, но в богатых смесях эта зависимость слабее.
14. В бедных и стехиометрических смесях с ростом давления значение  $(X_{\text{CO}})_{\text{max}}$  уменьшается, а в богатых — проходит через максимум при  $p = 3$  атм.
15. Увеличение относительной доли водорода в горючем приводит к незначительному снижению  $(X_{\text{CO}})_{\text{max}}$ .
16. Образованием сажи в бедных смесях  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-воздух}$  можно пренебречь.

17. Величина  $X_C$  снижается с ростом давления и начального содержания водяного пара, но увеличивается с ростом начальной температуры.
18. Зависимость  $X_C$  от  $R_{H_2}$  проявляется не всегда и носит достаточно сложный характер.

Таким образом, на основе решения задачи о структуре плоского ламинарного пламени создана база данных для характеристик ламинарного горения гомогенных воздушных смесей метан – водород – водяной пар в широком диапазоне начальной температуры  $293 \leq T_0 \leq 800$  К, давления  $1 \leq p \leq 40$  атм, коэффициента избытка горючего  $0,7 \leq \Phi \leq 1,5$ , начального содержания водяного пара  $0 \leq (X_{H_2O})_0 \leq 0,6$  и содержания водорода в горючем  $0 \leq R_{H_2} \leq 0,2$ . Приведены фрагменты таблиц для скорости ламинарного пламени, а также концентрации «быстрого» NO и максимальной концентрации CO в зоне горения. Базу данных планируется использовать для оптимизации геометрических и режимных параметров двигателей внутреннего сгорания и камер сгорания ГТУ.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 11-08-01168 и 11-08-97548-р-центр).

## Литература

1. Иванов В. С., Фролов С. М., Басара Б., Пришинг П., Суффа М. Многомерный расчет рабочего процесса в поршневом двигателе с искровым зажиганием // Горение и взрыв / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012. Вып. 5. С. 97–102.
2. Беляев А. А., Посвянский В. С. Программа для нахождения нормальной скорости распространения пламени // Алгоритмы и программы. Информ. бюлл. Госфонда алгоритмов и программ СССР, 1985. № 3(66). С. 35.
3. Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М. «Глобальные» кинетические механизмы ламинарных пламен для моделирования турбулентных реагирующих течений. Ч. 1. Основной химический процесс тепловыделения // Химическая физика, 1998. Т. 17. № 9. С. 112–128.
4. Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М. «Глобальные» кинетические механизмы ламинарных пламен для моделирования турбулентных реагирующих течений. Ч. 2. Образование окиси азота // Химическая физика, 1998. Т. 17. № 10. С. 71–79.

5. Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М. «Глобальные» кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений. Ч. III. Промотирование горения // Химическая физика, 1999. Т. 18. № 4. С. 67–74.
6. Евлампиев А. В., Фролов С. М., Басевич В. Я., Беляев А. А. «Глобальные» кинетические механизмы для моделирования турбулентных реагирующих течений. Ч. IV. Диффузионное горение // Химическая физика, 2001. Т. 20. № 11. С. 21–27.
7. Sholte, T. G., and P. B. Vaags. 1959. Burning velocities of mixtures of hydrogen, carbon monoxide and methane with air. *Combust. Flame* 3:511–24.
8. Yu, G., C. K. Law, and C. K. Wu. 1986. Laminar flame speeds of hydrocarbon + air mixtures with hydrogen addition. *Combust. Flame* 63(3):339–47.
9. Halter, F., C. Chanveau, N. Djebaili-Chanmeix, and I. Gokalp. 2005. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixture. *Proc. Combust. Inst.* 30(1):201–8.
10. Hermanns, R. T. E. 2007. Laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures. Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische Universiteit Eindhoven. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200711972.pdf>.
11. Burluka, A. A., M. Fairweather, M. P. Ormsby, C. G. W. Sheppard, and R. Woolley. 2007. The laminar burning properties of premixed methane–hydrogen flames determined using a novel analysis method. *3rd European Combustion Meeting ECM 2007*. 6-4:1–5.
12. Hu, E., Z. Huang, J. He, Ch. Jin, and J. Zheng. 2009. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane–hydrogen–air flames. *Int. J. Hydrogen Energy* 34:4876–88.