

18. Алдушин А. П., Маломед Б. А. Феноменологическое описание нестационарных неоднородных волн горения // Там же.— 1981.— 17, № 1.— С. 3.
19. Sivashinsky G. I. // J. App. 1. Math.— 1981.— 40.— P. 432.
20. Вольперт В. А., Вольперт А. И., Мержанов А. Г. // Докл. АН СССР.— 1982.— 262, № 3.— С. 642.
21. Вольперт В. А., Вольперт А. И., Мержанов А. Г. // Там же.— 1982.— 263, № 4.— С. 918.
22. Вольперт В. А., Вольперт А. И., Мержанов А. Г. Применение теории бифуркаций к исследованию нестационарных режимов горения // ФГВ.— 1983.— 19, № 4.— С. 69.
23. Щербак С. Б. Режимы неустойчивого горения образцов безгазовых составов в форме стержней квадратного и кругового сечения // ФГВ.— 1983.— 19, № 5.— С. 9.
24. Margolis S. V., Kaper H. G., Leaf G. K. // Combust. Sci. Technol.— 1985.— 43, N 3.— P. 127.
25. Маслов В. М., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. Экспериментальное определение максимальных температур процессов СВС // ФГВ.— 1978.— 14, № 5.— С. 79.
26. Струнина А. Г., Бутакова Э. А., Демидова Л. К. и др. Горение безгазовых смесей при криогенных температурах // Там же.— 1988.— 24, № 2.— С. 99.

п. Черноголовка

*Поступила в редакцию 22/XI 1989,
после доработки — 3/VII 1990*

УДК 614.841.12

Ю. И. Шебеко, А. Я. Корольченко, В. Г. Шамонин, С. Г. Цариченко

О ВЗАИМОСВЯЗИ БАРИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ И КИНЕТИКИ ТРИМОЛЕКУЛЯРНЫХ РЕАКЦИЙ ВО ФРОНТЕ ПЛАМЕНИ

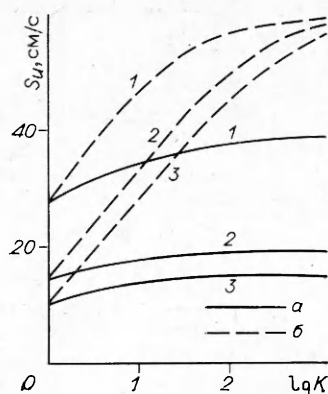
Путем численного моделирования распространения пламени по метано- и водородовоздушной смеси с учетом переноса и химических реакций изучена связь кинетики тримолекулярных реакций и барического показателя нормальной скорости горения. Показано, что чем ниже константы скоростей тримолекулярных реакций, тем выше величина барического показателя. Для метана барический показатель хотя и растет, но остается отрицательным, а для водорода имеет место смена его знака.

Зависимость нормальной скорости горения газозвоздушных смесей от давления принято описывать в ряде случаев полуэмпирическим выражением $S_u = S_{u0}(p/p_0)^n$, где S_u , S_{u0} — значения нормальной скорости горения при давлениях p и p_0 соответственно, n — барический показатель [1—3]. Величина n зависит от природы горючего вещества, состава смеси, параметров состояния и других факторов.

В работе [1] предложено следующее эмпирическое правило: если при $p \approx 0,1$ МПа и температуре $T \approx 300$ К и $S_u > 1$ м/с, значение n положительно, при $S_u \leq 1$ м/с $n < 0$. Это положение подтверждено достаточно большим числом экспериментальных данных, хотя детального теоретического обоснования оно все же не получило. В [4] численным моделированием сгорания смесей $H_2 + O_2 + N_2$ различного состава найдено, что барический показатель может изменять знак при $S_u > 1$ м/с. В работе [5] экспериментально показано, что в случае $p \geq 1,0$ МПа и $T \geq 570$ К изменение знака n для стехиометрических водородовоздушных смесей с объемным содержанием водяного пара 5—10 % происходит при $S_u \geq 3$ м/с. Отсюда следует, что эмпирическое правило [1] справедливо, по-видимому, только в диапазоне давлений и температур, близких к нормальному. В то же время возникает вопрос — какими же процессами во фронте пламени определяется знак барического показателя.

Одним из возможных факторов, обуславливающих смену знака n , является изменение с давлением и температурой относительной роли би- и тримолекулярных химических реакций во фронте пламени. Цель настоящей работы — теоретическая проверка этого предположения.

Рис. 1. Результаты расчета нормальной скорости горения метановоздушной смеси при уменьшении в k раз констант скоростей реакций X, XI (а) и II, X, XI (б).
 $p = 0,1$ (1), $0,5$ (2) и $1,0$ МПа (3).



Исследования проводили путем численного моделирования распространения пламени по гомогенной газовой смеси с детальным учетом переноса и химических процессов. Изучали метано- и водородовоздушную смесь стехиометрического состава. Методика расчетов подробно изложена в [6, 7]. Там же продемонстрирована ее адекватность с точки зрения расчета S_u . Кинетическая схема в случае метана включала в себя 23 прямые и 23 обратные реакции, константы скоростей заимствованы из [6]. Кинетическая схема для водородовоздушной смеси включала в себя следующие химические процессы:

- | | |
|---|--|
| I. $H + O_2 \rightleftharpoons OH + O$, | VI. $HO_2 + O \rightleftharpoons O_2 + OH$, |
| II. $H + O_2 + M \rightleftharpoons HO_2 + M$, | VII. $HO_2 + OH \rightleftharpoons O_2 + H_2O$, |
| III. $O + H_2 \rightleftharpoons OH + H$, | VIII. $HO_2 + H \rightleftharpoons OH + OH$, |
| IV. $OH + H_2 \rightleftharpoons H_2O + H$, | IX. $HO_2 + H \rightleftharpoons O_2 + H_2$, |
| V. $OH + OH \rightleftharpoons H_2O + O$, | X. $O + O + M \rightleftharpoons O_2 + M$, |
| | XI. $H + H + M \rightleftharpoons H_2 + M$. |

?
 $H + OH + M \rightarrow H_2O + M$

В эту схему включены все наиболее важные для распространения водородовоздушного пламени реакции. Процессы с участием H_2O_2 не учитывались, поскольку (см. [4, 9]) их учет практически не влияет на расчетную величину S_u . Константы скоростей реакций взяты из работы [8].

Температура исходной горючей газовой смеси была принята равной 298 К, $p = 0,1 \div 2,0$ МПа. Влияние тримолекулярных процессов исследовали путем варьирования констант скоростей реакций XI, X и II из приведенной выше кинетической схемы. При этом указанные константы уменьшались в k раз ($k = 0,1; 1; 10; 100; 1000$), в то же время константы скоростей обратных реакций оставались без изменения.

Вначале проведены расчеты при изменении констант скоростей только реакций X и XI. Результаты расчета значений S_u представлены на рис. 1, 2. Видно, что нормальная скорость горения слабо растет с увеличением k , особенно при $k = 10 \div 1000$. Вероятно, реакции X и XI играют существенную роль лишь в зоне догорания, химические процессы в которой не оказывают заметного влияния на нормальную скорость.

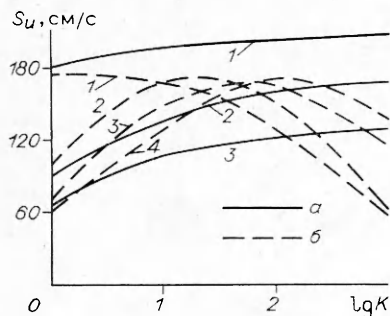


Рис. 2. Результаты расчета нормальной скорости горения водородовоздушной смеси при уменьшении в k раз констант скоростей X, XI (а) и II, X, XI (б).
 $p = 0,1$ (1), $0,5$ (2), $1,0$ (3) и $2,0$ МПа (4).

k	S_u , м/с	T_f , К	$[H]_{\max}$	$[O]_{\max}$	$[OH]_{\max}$
10^{-1}	0,1	2110	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,24 \cdot 10^{-4}$	$0,41 \cdot 10^{-3}$
10^0	0,7	2220	$0,48 \cdot 10^{-2}$	$0,67 \cdot 10^{-3}$	$0,36 \cdot 10^{-2}$
10^1	1,3	2360	$0,12 \cdot 10^{-1}$	$0,39 \cdot 10^{-2}$	$0,12 \cdot 10^{-1}$
10^2	1,8	2190	$0,35 \cdot 10^{-1}$	$0,93 \cdot 10^{-2}$	$0,15 \cdot 10^{-1}$
10^3	1,4	1860	$0,70 \cdot 10^{-1}$	$0,12 \cdot 10^{-1}$	$0,15 \cdot 10^{-1}$

Примечание. $p = 2$ МПа.

Изменения констант скоростей всех трех реакций рекомбинации радикалов II, X, XI оказывают большое воздействие на величину S_u . Очевидно, это связано с существенной ролью реакции II во фронтах обоих пламен. Однако в случае смеси $CH_4 +$ воздух величина n хотя и возрастает с увеличением k , но остается положительной, а для $H_2 +$ воздух знак n изменяется: $n = -0,41, -0,04, 0,10$ и $0,34$ при $k = 1, 10, 100$ и 1000 соответственно. Отметим, что близкое к экспериментально наблюдаемому значение n реализуется для смеси $H_2 +$ воздух лишь при $k = 1000$ ($n = 0,34$ — расчет, $n = 0,40$ — эксперимент [10]). В то же время при $k = 1, p = 0,1$ МПа и $T = 298$ К для этих смесей $n < 0$, а эксперимент и эмпирическое правило дают $n > 0$. Это, вероятно, связано с недостаточно адекватным описанием кинетики химических реакций (например, из-за неточностей в константах скоростей химических реакций). В случае смеси $CH_4 +$ воздух расчетное и экспериментальное [11] значения практически совпадают ($n \approx -0,5$).

Интересной особенностью обладают зависимости $S_u(k)$ смеси $H_2 +$ воздух, имеющие максимумы. Обусловлено это, вероятно, следующими обстоятельствами. С ростом k возрастают концентрации активных центров и изменяется максимальная температура пламени T_f (см. таблицу).

Скорость брутто-реакции во фронте пламени и связанная с ней нормальная скорость горения определяются концентрацией активных центров и температурой, при которой происходит химический процесс. Поскольку в случае $k > 10$ указанные факторы изменяются по-разному (одна величина возрастает, а другая — падает), возникает экстремум в зависимости $S_u(k)$. Для метановоздушной смеси экстремума не наблюдается, что, вероятно, обусловлено различиями в химической кинетике горения водорода и метана. В дальнейшем этот факт требует более детального исследования.

При $k = 0,1$ (т. е. в случае высоких констант скоростей рекомбинации радикалов) нормальная скорость горения водородовоздушной смеси при $p = 2,0$ МПа падает с $0,6$ до $0,1$ м/с, что обусловлено существенным снижением концентраций активных центров во фронте пламени (в последнем случае более чем на порядок).

Из приведенных результатов следует, что величина n в значительной степени определяется кинетикой тримолекулярных реакций пламени. И чем выше относительная роль реакций рекомбинации, тем ниже n . В связи с этим могут быть качественно объяснены результаты работы [5], в которой найдено, что добавление в стехиометрическую смесь $H_2 +$ воздух паров воды приводит к смене знака n . Действительно, согласно [12], молекулы воды обладают на порядок более высокой эффективностью в качестве третьей частицы в реакциях трехчастичной рекомбинации по сравнению с молекулами H_2, O_2, N_2 . Вследствие этого введение в водородовоздушную смесь водяного пара может заметно увеличить константы скоростей реакций рекомбинации активных центров и тем самым привести к уменьшению барического показателя нормальной скорости горения вплоть до смены его знака. Данное объяснение, безусловно, качественное и нуждается в дальнейшей теоретической и экспериментальной проверке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Льюис В., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах.— М.: Мир, 1968.
2. Бабкин В. С., Бухаров В. Н., Мольков В. В. Нормальная скорость пламени в пропановоздушной смеси при высоких давлениях и температурах // ФГВ.— 1989.— 25, № 1.— С. 57.
3. Metghalchi M., Keck J. C. Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane and indolene at high pressure and temperature // Combust. Flame.— 1982.— 48, N 2.— P. 191.
4. Behrendt F., Warnatz J. The dependence of flame propagation in $H_2 - O_2 - N_2$ mixtures on temperature, pressure and initial composition // Int. J. Hydrogen Energy.— 1985.— 10, N 11.— P. 749.
5. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Цариченко С. Г. и др. Влияние начального давления и температуры на характеристики горения водородсодержащих смесей // ФГВ.— 1989.— 25, № 3.— С. 32.
6. Мольков В. В., Шамонин В. Г., Баратов А. Н. Распространение пламени гомогенной газовой смеси при повышенных давлениях и температурах // Горение гетерогенных и газовых систем: Материалы VIII Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1986.
7. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Баратов А. Н. и др. Влияние процессов переноса на распространение метановоздушного пламени // ФГВ.— 1988.— 24, № 5.— С. 79.
8. Smoot L. D., Hecker W. C., Williams G. A. Prediction of propagation methane — air flames // Combust. Flame.— 1976.— 26, N 3.— P. 323.
9. Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С. Распространение ламинарного пламени. Роль H_2O_2 при горении системы $H_2 - O_2$ // Хим. физика.— 1982.— № 6.— С. 842.
10. Higima T., Takeno T. Effects of temperature and pressure on burning velocity // Combust. Flame.— 1986.— 65, N 1.— P. 35.
11. Andrews G. E., Bradley D. The burning velocity of methane — air mixtures // Combust. Flame.— 1972.— 19, N 2.— P. 275.
12. Азатян В. В., Шавард А. А. Самоторможение горения водорода и некоторые вопросы неизотермического режима цепных реакций // Кинетика и катализ.— 1981.— 22, № 1.— С. 101.

г. Балашиха

Поступила в редакцию 10/VIII 1989,
после доработки — 20/VII 1990

УДК 536.46

Г. М. Махвиладзе, В. И. Мелихов

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ЗАКРЫТОМ КАНАЛЕ С ХОЛОДНЫМИ БОКОВЫМИ СТЕНКАМИ

На основе полных нестационарных двумерных уравнений, описывающих движение реагирующего газа, получено решение задачи о распространении пламени в плоском канале с холодными боковыми стенками. Подробно исследуется процесс погасания пламени. Численно и аналитически определены значения критических чисел Пекле. Выявлены закономерности распространения пламени в отсутствие погасания.

В [1] проведен сквозной расчет процесса распространения двумерного пламени в закрытом плоском канале. С целью упрощения задачи боковые стенки считались теплоизолированными (в реальных условиях через них отводится тепло). Наличие холодных стенок приводит к ряду новых эффектов, главный из которых — предел горения: при определенных критических условиях пламя теряет способность распространяться по свежей смеси.

В силу значения критических явлений как для понимания фундаментальных свойств пламени, так и для приложений исследованию пределов горения посвящено большое число работ, накоплен богатый экспериментальный материал [2].

Основы теории предела заложены в [3], где при рассмотрении горения в узких трубках показано, что в силу обратной связи между нормальной скоростью распространения пламени и величиной теплопотерь из зоны реакции существует предельная минимально возможная ско-