

частей топлива идет независимо друг от друга. На том же рисунке приведены результаты расчета η_c в рамках предложенной выше модели (кривые 1' и 2'). Видно, что она в целом верно описывает результаты эксперимента. Сильное отличие расчетного и экспериментально полученного распределений η_c вблизи стабилизаторов пламени ($\bar{x} < 20$), по-видимому, связано с влиянием областей рециркуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В. Р. Влияние турбулентности на горение распыленного жидкого топлива // ФГВ.— 1988.— 24, № 6.— С. 51.
2. Абрамович Г. Н., Гиринович Т. А., Крашенинников С. Ю. и др. Теория турбулентных струй.— М.: Наука, 1984.
3. Теория топочных процессов/Под ред. Г. Ф. Кнорре, И. И. Панеева.— М.; Л.: Энергия, 1966.
4. Chin J. S., Lefevre A. H. Steady-state evaporation characteristics of hydrocarbon fuel drops // AIAA J.— 1983.— 21, N 10.— P. 1437.
5. Кузнецов В. Р., Лебедев А. В., Секундов А. Н. и др. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение газов и натуральных топлив.— Черногловка, 1980.
6. Кузнецов В. Р., Лебедев А. Б., Секундов А. Н. и др. Расчет турбулентного диффузионного факела горения с учетом пульсаций концентрации и архимедовых сил // МЖГ.— 1977.— № 1.— С. 30.
7. Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение.— М.: Наука, 1986.
8. Law C. K. Recent advances in droplet vaporization and combustion // Progr. in Energy and Combust. Sci.— 1982.— 8, N 3.— P. 171.
9. Дубовкин Н. Ф., Маланичева В. Г., Массур Ю. П. и др. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив.— М.: Химия, 1985.
10. Hubbard G. L., Denny V. E., Mills A. F. Droplet evaporation: effects of transients and variable properties // Int. J. Heat Mass Transfer.— 1975.— 18, N 9.— P. 1003.
11. Валеев Р. С., Кудрявцев А. В., Кунцев Г. М. Экспериментальное исследование распыливания жидкости, подаваемой струйной форсункой перпендикулярно направлению потока воздуха // Изв. ВУЗов. Авиац. техника.— 1984.— № 3.— С. 87.

г. Москва

Поступила в редакцию 11/IX 1989,
после доработки — 12/IV 1991

УДК 614.841.12

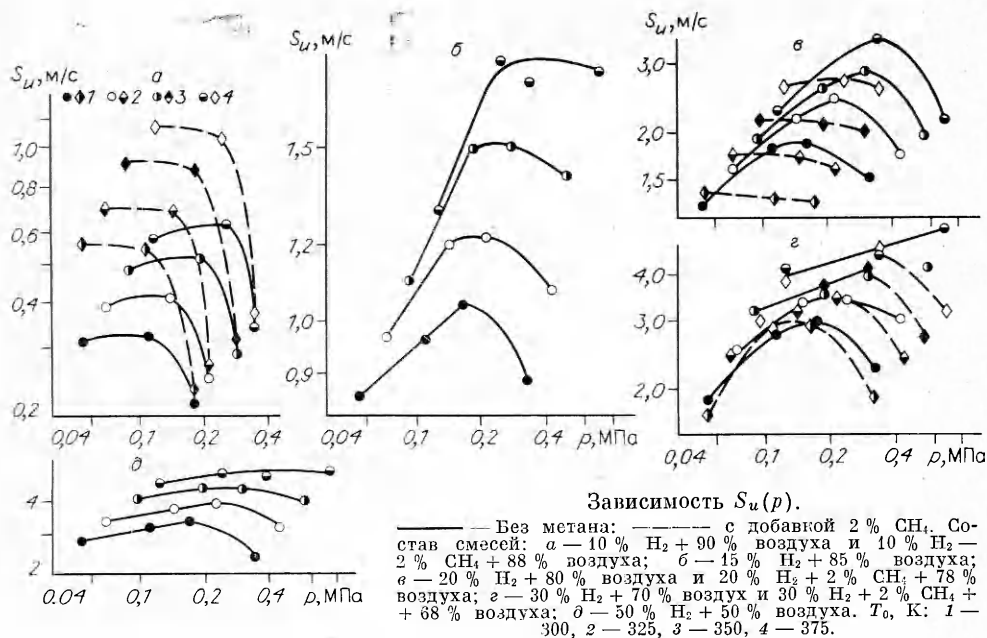
Ю. Н. Шебеко, С. Г. Цариченко, А. Я. Корольченко, А. Н. Ерофеев

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ ВОДОРОД — МЕТАН — ВОЗДУХ В ЗАМКНУТОМ СОСУДЕ

Экспериментально определены характеристики горения смесей водород — метан — воздух в замкнутом сосуде. Для смесей водород — воздух при определенных давлениях характерно изменение знака барического показателя нормальной скорости горения, причем при $S_u > 0,5$ м/с. При добавлении в водородовоздушную смесь метана изменение знака барического показателя с положительного на отрицательный может происходить даже при абсолютном увеличении нормальной скорости горения.

Изучение параметров горения газозвушных смесей в замкнутых сосудах представляет интерес как для практики (пожаро- и взрывобезопасность технологических процессов, двигатели внутреннего сгорания и т. д.), так и для развития теоретических представлений о процессах сгорания газов (например, зависимость нормальной скорости горения S_u от давления p и температуры T). Важное значение при этом имеет исследование горения как чистых водородовоздушных смесей, так и при добавлении к ним углеводородов и других относительно медленногорящих газов (например, оксида углерода). Следует отметить работы [1—6], где изучено влияние p , T и различных добавок на нормальную скорость горения водородовоздушных смесей.

Для стехиометрических смесей $H_2 +$ воздух нормальная скорость горения S_u растет с давлением, т. е. барический показатель n положителен [3]. В то же время для составов $H_2 —$ воздух, близких к предель-



ным по концентрации горючего, величина n может быть отрицательной [5]. Интересное явление обнаружено в работе [6]: при добавлении в стехиометрическую водородовоздушную смесь 5 % (об.) паров воды при $T = 200^\circ\text{C}$ и $p = 1$ МПа происходит смена знака n , хотя при этом $S_u = 3 \div 4$ м/с. Вызвано ли это явление специфическим влиянием водяного пара или оно имеет другую природу — осталось невыясненным. В [7] теоретически показано, что смена знака барического показателя с ростом давления может наблюдаться и для смесей водород — кислород — азот без добавок водяного пара.

В настоящей работе ставится задача исследования характеристик горения смесей водород — метан — воздух в замкнутом сосуде; максимальное давление взрыва, скорость нарастания давления взрыва, нормальная скорость горения. Особое внимание уделяется изучению изменения знака n в зависимости от состава смеси, T и p .

Эксперименты выполняли на установке, подробно описанной в [6]. Основу ее составляет сферический реакционный сосуд объемом 4,2 дм³ (диаметр 0,2 м). Смесей готовили по парциальным давлениям в предварительно откачанном сосуде. Зажигание происходило в центре от электрической искры с энергией $1 \pm 0,25$ Дж. Давление в сосуде в процессе сгорания смеси регистрировали датчиками Сапфир-22 и записывали на шлейфовый осциллограф. Относительная погрешность измерения давления взрыва, скорости его нарастания и нормальной скорости горения определяется систематической погрешностью измерительных устройств и не превышает 10 %. Зависимости $S_u(p)$ и $S_u(T)$ определяли по методике [8, 9]. Изучали горение смесей H_2 + воздух с объемной концентрацией $[\text{H}_2]$ от 10 до 50 % и аналогичных составов с добавками 2 % метана. Начальная температура составляла 293 К, начальное давление p_0 изменялось от 0,05 до 0,3 МПа.

Результаты определения максимального давления взрыва p_{\max} и средней скорости нарастания давления взрыва $(dp/dt)_{\text{ср}}$ представлены в таблице. Видно, что для достаточно бедных смесей эти величины возрастают при добавлении в смесь метана, а для стехиометрических и богатых падают. Причины этого ясны: с добавлением метана бедные смеси приближаются к стехиометрическим, а стехиометрические и богатые — к верхнепределным.

Результаты определения S_u представлены на рисунке. Величины, полученные в настоящей работе при $p = 0,1$ МПа, $T = 300$ К и $[\text{H}_2] =$

Состав смеси, %			p_0 , МПа	p_{\max}/p_0	$(dp/dt)_{\text{ср}}$, МПа/с
H ₂	CH ₄	Воздух			
10	0	90	0,05	3,4	2,8
15		85		4,5	12,0
20		80		5,9	38,0
30		70		6,7	110,0
50		50		5,6	70,0
10	2	88	0,05	4,6	10,0
20		78		6,0	42,3
30		68		6,5	74,0
10	0	90	0,10	2,9	3,9
15		85		4,3	29,0
20		80		5,6	85,0
30		70		6,6	150,0
10	2	88	0,10	4,3	16,0
20		78		6,6	120,0
30		68		6,6	140,0
10	0	90	0,15	3,0	3,5
15		84		4,5	—
20		80		6,3	200,0
30		70		7,1	470,0
50		50		6,3	300,0
10	2	90	0,15	4,1	0,80
15		84		5,7	73,0
20		78		7,1	200,0
30		66		7,2	33,0
50		48		5,3	26,0
10	0	90	0,3	3,0	5,0
15		95		4,5	99,0
20		80		6,3	230,0
30		70		7,3	880,0
50		50		6,2	480,0
10	2	90	0,3	4,5	15,0
15		85		5,8	150,0
20		80		6,7	240,0
30		66		6,3	430,0

$= 10 \div 50 \%$, с относительной погрешностью не выше 20 % согласуются с данными [4]. Для стехиометрических водородовоздушных смесей при $p = 0,05 \div 0,2$ МПа и $T = 300 \div 325$ К, значение $n = 0,45 \div 0,60$ достаточно близко к 0,43, полученному в [3]. Это свидетельствует об определенной надежности данных настоящего исследования.

В случае отсутствия метана при $p = 0,05 \div 0,2$ МПа и $[H_2] = 10 \div 50 \%$ наблюдается рост S_u , барический показатель положителен в соответствии с общепринятыми представлениями. С уменьшением концентрации водорода от 30 до 10 % величина n падает. При $[H_2] = 10, 15$ и 20 % с повышением T значение n возрастает, в то время как для $[H_2] = 30$ и 50 % имеет место обратная зависимость.

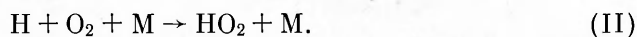
Интересно отметить, что зависимость $S_u(p)$ для многих водородовоздушных смесей характеризуется наличием максимума, положение которого существенно зависит от T и относительно слабо от $[H_2]$. Это качественно согласуется с результатами численного моделирования [7]. Относительно малое количество экспериментальных точек в настоящей работе не позволяет точно определить величину и положение экстремума, однако его существование можно констатировать достаточно определенно.

Представляет интерес проанализировать влияние добавки метана на характер зависимости $S_u(p)$. Для $[H_2] = 10\%$ обращает на себя внимание вполне понятное возрастание S_u по сравнению со случаем отсутствия метана, обусловленное повышением T . В то же время, несмотря на рост S_u , происходит смена знака барического показателя. Согласно [10], $n > 0$ при $S_u \leq 0,5$ м/с и $n < 0$ при $S_u \geq 0,5$ м/с. Отсюда следует ожидать, что в случае $n > 0$ увеличение S_u никак не может привести к смене знака n вопреки данным, представленным на рисунке. Аналогичная ситуация (хотя и без увеличения S_u) наблюдается при добавлении метана и $[H_2] = 20\%$ (рисунок *в*). Для $[H_2] = 30\%$ в области низких давлений (ниже тех, для которых наблюдался максимум S_u) в пределах ошибки значения S_u одинаковы для смесей с метаном и без него. Однако при больших p для смеси с метаном величина S_u уменьшается с увеличением p более резко.

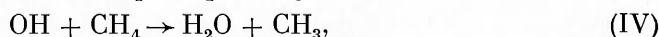
Указанные выше закономерности могут быть качественно объяснены следующим образом. Как показано в работе [7], величина и знак барического показателя обусловлены конкуренцией реакции разветвления



и реакциями обрыва цепи. Для водородовоздушной смеси наиболее важной реакцией, обуславливающей обрыв, является процесс



При наличии в горючей смеси метана имеют место и другие реакции, приводящие к обрыву цепи, например:



В (III)—(V) образуется относительно малоактивный радикал CH_3 , в силу чего их можно считать реакциями обрыва (для процессов (III), (IV) это очевидно; в (V) две свободные валентности радикала O преобразуются в одну свободную валентность радикала OH , что эквивалентно обрыву). В соответствии с изложенным, при увеличении относительной роли реакции обрыва цепи величина n должна уменьшаться, что и наблюдается в настоящих экспериментах при добавлении в водородовоздушную смесь метана.

Приведенное выше объяснение носит, безусловно, сугубо качественный характер и требует уточнения в ходе дальнейших исследований.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально определены характеристики горения смесей водород — метан — воздух в замкнутом сосуде. Показано, что для рассмотренных $H_2 + \text{воздух}$ при определенных давлениях характерно изменение знака барического показателя нормальной скорости горения, в том числе при $S_u > 0,5$ м/с. При добавлении в водородовоздушную смесь метана изменение знака n на отрицательный может происходить даже при абсолютном увеличении S_u . Дана качественная интерпретация полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Milton B. E., Keck J. C. Laminar burning velocities in stoichiometric hydrogen and hydrogen — hydrocarbon gas mixtures // Combust. Flame.— 1984.— 58, N 1.— P. 13—22.
2. Басевич В. Я., Беляев А. А., Новожилов Б. В. и др. Численное исследование ламинарного распространения пламени для определения физико-химических характеристик горючей смеси // Горение гетерогенных и газовых систем: Материалы VIII Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1986.— С. 8—11.
3. Iijima T., Takeno T. Effects of temperature and pressure on burning velocity // Combust. Flame.— 1986.— 65, N 1.— P. 35—43.

4. Cherian M. A., Rhodes P., Simpson R. J. et al. Kinetic modelling of the oxidation of carbon monoxide in flames // 18th Symp. (Int.) on Combust.— Pittsburgh: The Combust. Inst., 1981.— P. 385—395.
5. Бабкин В. С., Вьюн А. В. Ингибирование водородно-воздушных пламен при высоких давлениях // ФГВ.— 1981.— 17, № 5.— С. 8—13.
6. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Цариченко С. Г. и др. Влияние начального давления и температуры на характеристики горения смесей // Там же.— 1989.— 25, № 1.— С. 32—36.
7. 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—755.
8. Мольков В. В., Бухаров В. Н., Бабкин В. С. и др. Определение нормальной скорости пламени методом обратной задачи в бомбе постоянного объема // Пожарная профилактика.— М.: ВНИИПО, 1986.— С. 37—48.
9. ГОСТ 12.1.044-84. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
10. Льюис В., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах.— М.: Мир, 1968.

г. Балашиха

Поступила в редакцию 8/X 1990,
после доработки — 20/II 1991

УДК 536.46

А. П. Алдушин, К. И. Звиненко

ГОРЕНИЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА С ГАЗООБРАЗНЫМИ ПРОДУКТАМИ РЕАКЦИИ

Теоретически рассмотрено и экспериментально подтверждено существование стационарной волны горения в пористой реагирующей среде химических источников чистых газов при теплообмене исходного вещества с газообразными продуктами реакции. Отмечено, что температура горения в этом случае превышает адиабатическую температуру сгорания вещества. Проанализированы возможные механизмы горения.

В [1] показано, что фильтрация теплоносителя через реагирующую среду в направлении распространения фронта реакции приводит к перегреву зоны горения относительно термодинамической температуры адиабатического сгорания вещества. Возможность организации такого рода «сверхадиабатического» процесса имеет принципиальное значение, поскольку открывает путь для сжигания низкокалорийных систем без дополнительных энергозатрат.

При горении пиротехнических газогенерирующих смесей повышение температуры в зоне горения может быть достигнуто и без специального массообмена с внешней средой за счет использования тепла газообразных продуктов реакции. Генерируемый газ, проходя через реагирующее вещество, способен выполнять роль теплоносителя, нагревающего исходную смесь. Особенностью данного случая по сравнению с известными схемами «сверхадиабатического» горения является жесткая обратная связь между плотностью фильтрационного потока и скоростью волны реакции. В таких системах стационарный режим горения возможен лишь при условии автостабилизации процессов газовыделения и воздействия фильтрационного потока на температуру и скорость распространения зоны реакции.

В рамках модельных представлений пиротехнической смеси в виде изотропной реагирующей пористой среды уравнения стационарного распространения фронта горения имеют вид

$$mc(1 - \eta v c_1/c) T' = Qw + \lambda T'' + \alpha(T_1 - T), \quad (1)$$

$$m v c_1 (\xi - \eta) T_1' = v c_1 w (T_1 - T) + \alpha(T_1 - T), \quad (2)$$

$$m \eta' = w, \quad w = k_0 \exp(-E/RT) f(\eta), \quad (3)$$

$$x = -\infty: T = T_1 = T_0, \quad \eta = 0; \quad x = \infty: T = T_1 = T_r, \quad \eta = 1. \quad (4)$$

Здесь штрих означает дифференцирование по пространственной переменной x ; m — массовая скорость горения; T, T_1 — температура конденсированной фазы и газа; c, c_1 — теплоемкость исходного вещества и газообразного