

частицами окиси магния, образующейся при горении, необходимо учитывать температурную зависимость мнимой части комплексного показателя преломления.

Авторы выражают благодарность Е. Н. Кондратьеву и С. В. Козицкому за полезные обсуждения результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борей К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами.— М.: Мир, 1986.
2. Plass G. N. Appl. Optics, 1964, 3, 7, 867.
3. Plass G. N. Appl. Optics, 1965, 4, 12, 1616.
4. Белинский Н. И., Козицкий С. В., Флорко А. В. // Физика аэродисперсных систем.— Киев; Одесса, 1985.— Вып. 28.
5. Флорко А. В., Золотко А. Н. и др. ФГВ, 1982, 18, 1, 17.
6. Флорко А. В., Козицкий С. В. и др. ФГВ, 1983, 19, 6, 24.
7. Голубовский Ю. Б. Вестн. ЛГУ, 1967, 10.
8. Физико-химические свойства окислов: Справочник.— М.: Metallургия, 1978.
9. Опсик М. Н. Сложный теплообмен.— М.: Мир, 1976.
10. Шевчук В. Г., Кондратьев Е. Н. и др. ФГВ, 1982, 18, 5, 70.

Поступила в редакцию 6/Х 1987

УДК 614.841.12

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ

Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, С. Г. Цариченко,
В. Ю. Навценя, В. Л. Малкин

(Балашиха)

Характеристики горения водорода при начальных условиях, близких к нормальным, достаточно хорошо изучены [1—5]. Однако для решения вопросов обеспечения пожаро- и взрывобезопасности технологических процессов необходимо располагать данными по параметрам горения в условиях повышенных давлений p и температур T . Систематических исследований в этой области не проводилось. В [6] изложены результаты определения концентрационных пределов распространения пламени в смеси $H_2 + O_2 +$ водяной пар при $T = 293 \div 473$ К и $p \leq 2$ МПа. В [7, 8] изучено влияние начального давления (до 10,0 МПа) на концентрационные пределы смеси $H_2 + O_2$ при постоянной начальной температуре T_i .

Результаты исследований нормальной скорости распространения пламени в водородсодержащих газовых смесях при повышенных T_i и p приводятся в [9—12]. В настоящей работе исследовано влияние p и T на нормальную скорость горения S_u стехиометрических водородовоздушных смесей с добавками водяного пара и на нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) гремучего газа ($2H_2 + O_2$) в водяном паре.

Измерение S_u проводили по методу бомбы постоянного объема с использованием сферического реакционного сосуда из нержавеющей стали диаметром 0,2 м. Сосуд размещали в воздушном термостате, позволяющем поддерживать заданную температуру в интервале 293—473 К. Температурная неоднородность по стенкам реакционного сосуда не превышала 15 К. Для проведения эксперимента предварительно нагретый реакционный сосуд вакуумировали до остаточного давления 1 кПа, затем по парциальным давлениям дозировали компоненты исследуемой смеси. После заполнения смесь 10 мин выдерживали для перемешивания. В предварительных опытах установлено, что выдержка смеси более 10 мин не влияет на результаты эксперимента.

Горение инициировали пережиганием расположенной в центре сосуда нихромовой проволоочки диаметром 0,5 и длиной 4 мм. Использование искрового зажигания при повышенных давлениях во влажной атмосфере оказалось неэффективным из-за высокой вероятности пробоя по поверхности электродов. Изменение давления в реакционном сосуде в процессе сгорания смеси регистрировали датчиком и светолучевым осциллографом с разрешающей способностью 10^{-3} с.

Нормальную скорость горения вычисляли по методике [13, 14] путем сравнения рассчитанного на ЭВМ (по методу [15]) изменения давления в замкнутом сосуде от времени с экспериментальными данными. Описывая изменение нормальной скорости горения в адиабатическом приближении выражением

$$S_u = S_{ui}\pi^\epsilon \quad (1)$$

в котором S_{ui} — начальная нормальная скорость горения, π — безразмерное давление, ϵ — термокинетический показатель, оптимизировали параметры S_{ui} и ϵ , определяющие значение нормальной скорости.

Далее учитывали, что температура несгоревшего газа T_u в процессе адиабатического сжатия связана с начальной температурой соотношением

$$T_u = T_i \pi^{(\gamma_u - 1)/\gamma_u} \quad (2)$$

где γ_u — показатель адиабаты свежей смеси. Соотношения (1) и (2) позволяют характеризовать изменение S_u с ростом T и p смеси в процессе адиабатического взрыва.

НКПР пламени в смеси гремучего газа с водяным паром определяли на установке, в которой в качестве реакционного сосуда использован термостатируемый металлический цилиндр объемом 53 дм³ (диаметр 300, высота 800 мм) [16]. В эксперименте при $T \leq 473$ К разность температур между двумя любыми точками реакционного сосуда не превышала 20 К.

Нагретый до температуры опыта реакционный сосуд вакуумировали до остаточного давления 1 кПа. Затем в него подавали воду в несколько приемов с тем, чтобы каждая порция успевала испариться, а стенки сосуда — принять заданную температуру. После этого дозировали последовательно водород и кислород. По заполнении сосуда смесью включали на 15 мин расположенный у дна нагреватель конвективного перемешивания. Перемешанную смесь зажигали пережиганием нихромовой проволоочки диаметром 0,5 и длиной 20 мм.

Результат опыта оценивали по изменению давления и температуры в реакционном сосуде, регистрируемому датчиком давления и термопарой, установленными в верхней части. Принимали, что пламя распространяется по объему, если избыточное давление после зажигания превысило 0,01 МПа, а повышение температуры — 300 К. В качестве предела принимали среднюю из двух концентраций, при одной из которых трижды было зафиксировано распространение пламени, а при другой — «отказы». В соответствии с [6] концентрации компонентов в предельных смесях с водяным паром выражали в массовых долях. Относительная погрешность измерений нижнего предела составила 10 %.

В опытах с флегматизатором в качестве последнего использовали перегретый и насыщенный водяной пар и азот. Температура перегретого пара 473 К, а его парциальное давление в смеси задавали исходя из требуемой по условиям опыта массовой концентрации пара с помощью данных [17]. Температура насыщенного пара соответствовала требуемому по условиям опыта парциальному давлению флегматизатора. Температура газовой среды в опытах с азотом 293 К, концентрации компонентов выражали в объемных долях.

В табл. 1 приведены полученные в экспериментах значения параметров S_{ui} и ϵ , характеризующие зависимость нормальной скорости горения S_u от безразмерного давления в процессе адиабатического взрыва в замкнутом сосуде для различных p_i , T_i и концентраций водяного пара

Таблица 1

c_{H_2O} , %	p_i , МПа	T_i , К	ε	S_{ui} , м/с	
				Эксперимент	Данные [11] для $p_i=0,1$ МПа
0	0,6	423	0,94	4,0	4,3
5			0,65	4,5	3,5
10			0,73	2,3	3,0
20			0,75	2,2	2,1
30			0,33	0,5	1,4
0	0,6	473	0,97	3,3	5,0
5			0,75	5,7	4,2
10			0,70	3,2	3,6
20			0,75	2,9	2,5
30			0,73	1,0	1,7
0	1,1	423	0,55	5,8	4,3
5			0,55	3,3	3,5
10			0,40	1,9	3,0
20			0,75	2,0	2,1
30			0,40	0,3	1,4
0	1,1	473	1,05	4,4	5,0
5			0,50	5,9	4,2
10			0,70	2,8	3,6
20			0,75	2,9	2,5
30			0,90	0,4	1,7

Примечание. Состав смеси: водяной пар с концентрацией c_{H_2O} + стехиометрическая водородовоздушная смесь (соотношение между водородом и воздухом 0,29 : 0,71) с концентрацией $(100 - c_{H_2O})$.

c_{H_2O} . Погрешность определения S_{ui} и ε составляет $\sim 20\%$. При этом следует отметить, что в заданных диапазонах значение функционала, описывающего различия экспериментальных и расчетных значений давления взрыва, слабо зависит от S_{ui} и ε . С учетом довольно высокой погрешности измерений S_{ui} и ε могут быть поняты некоторые качественные несоответствия в их величинах (например, при $p_i = 0,6$ МПа, $c_{H_2O} = 0$ значение S_{ui} для $T_i = 423$ К выше, чем для $T_i = 473$ К).

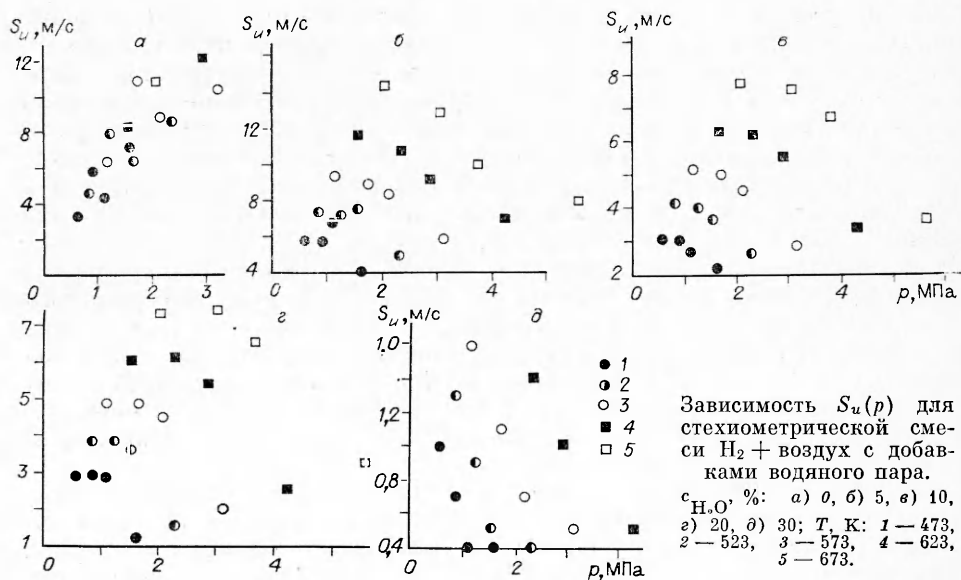


Таблица 2

$T_{см}, K$	$p_{см}, MPa$	$c_*, \%$	
		Эксперимент	Данные [6]
<i>Насыщенный пар</i>			
393	0,25	13,0+1,5	16,6
431	0,80	15,5+1,5	15,7
463	1,67	15,5+0,5	14,0
479	2,30	15,5+0,5	12,7
<i>Перегретый пар</i>			
473	0,4	13,2+0,6	—
473	0,5	—	15,6
473	1,3	13,2+0,2	13,8
473	2,0	12,9+0,6	12,7

Примечание. $p_{см}, T_{см}$ — параметры смеси; c_* — нижний концентрационный предел.

Таблица 3

$p_{см}, MPa$	$c_*, \%$	
	Настоящая работа	Результаты [18]
0,5	18,5+0,5	16,0
1,0	18,5±0,5	19,0
1,5	19,5+0,5	19,5
2,0	20,5+0,5	20,0

Найденные в настоящей работе величины ϵ достаточно близки к ϵ , полученным в работе [15] для водородовоздушных смесей. Согласно [15], при обычной температуре и атмосферном давлении $\epsilon = 0,49 \div 0,68$.

На рисунке представлены результаты определения нормальной скорости горения в зависимости от давления для различных температур. Для водородовоздушных смесей при отсутствии пара S_u , как правило, растет вместе с p , что согласуется с данными [12]. Если в смеси присутствует водяной пар, то S_u уменьшается с ростом p даже при относительно небольшом (5 %) его содержании.

Относительно слабое снижение S_u с увеличением p при $c_{H_2O} = 5\%$ свидетельствует, что в диапазоне концентраций водяного пара в смеси 0—5 % барический показатель нормальной скорости горения меняет знак для исследованных температур и давлений. Причина указанного явления недостаточно ясна и требует более детального исследования. Из сопоставления величин S_u , полученных методом горелки для смесей $H_2 + \text{воздух} + \text{водяной пар}$ при $p = 1$ атм и повышенных температурах [11], с данными настоящей работы видно, что значения S_u , приведенные в [11], заметно выше определенных методом бомбы постоянного объема. Это различие наиболее велико для составов с высоким содержанием водяного пара.

Результаты определения НКПР c_* пламени в смеси гремучего газа с перегретым и насыщенным водяным паром при повышенных давлениях и температурах представлены в табл. 2. Здесь же для сравнения приведены экспериментальные данные [6] с использованием реакционного сосуда объемом 16 дм³ с внутренним диаметром 200 мм. Полученные в настоящей работе результаты позволяют констатировать, что с увеличением p величина НКПР гремучего газа в составах с насыщенным и перегретым паром изменяется относительно слабо. Это качественно согласуется с имеющимися в литературе данными [7, 8] о слабой зависимости от давления c_* для водорода в кислороде и в воздухе. Несколько различный характер зависимости $c_*(p)$ в данной работе и в [6], вероятно, обусловлен влиянием диаметра реакционного сосуда на величину предела.

На описанной выше установке проведены опыты по определению c_* для гремучего газа в смеси с азотом в отсутствие пара при повышенных начальных давлениях и $T_0 = 293$ К. Полученные результаты (табл. 3) качественно согласуются с данными, приведенными в [18] для реакционного сосуда емкостью 16 дм³, и свидетельствуют о повышении c_* с ростом p .

Таким образом, проведено экспериментальное исследование характеристик горения смесей водород + воздух (кислород) + водяной пар при повышенных давлениях и температурах. Определены нормальная скорость горения для стехиометрических смесей водород + воздух + водяной пар. Выявлено, что барический показатель нормальной скорости горения положителен для водородовоздушных смесей без пара и отрицателен для

составов, содержащих более 5 % пара. Найдена величина нижнего концентрационного предела гремучего газа в смеси с водяным паром и азотом при повышенных давлениях и температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coward H. F., Janes G. M. Bulletin 503. Bureau of Mines.— Washington, 1952.
2. Zabatakis M. G. Bulletin 627. Bureau of Mines.— Washington, 1965.
3. Dvell J. L., Belles F. E. NASA Report 1383. Survey of hydrogen combustion properties, 1958.
4. Макеев В. И., Гостинцев Ю. А., Строгонов В. В. и др. ФГВ, 1983, 19, 5, 16.
5. Kumar R. K., Tamm H., Harrison W. C. Comb. Sci. Technol., 1983, 35, 1/4, 175.
6. Kogarko S. M., Lyamin A. G., Popov O. E. Hydrogen Behaviour and Control and Related Containment Loading Aspects.— Vienna: Atomic Energy Agency, 1984.
7. Когарко С. М., Рябиков О. Б. ФГВ, 1970, 6, 3, 406.
8. Янтовский С. А., Черняк М. В. ЖФХ, 1966, 40, 11, 2899.
9. Бабкин В. С., Вьюн А. В. ФГВ, 1981, 17, 5, 8.
10. Dixon-Lewis G. Arch. Comb., 1984, 4, 4, 279.
11. Lui D. D. S., McFarlaner. Comb. Flame, 1983, 49, 1—3, 59.
12. Eegena T., Takeo T. Comb. Flame, 1986, 65, 1, 35.
13. Мольков В. В., Бухаров В. Н., Бабкин В. С. и др. // Пожарная профилактика.— М.: ВНИИПО, 1986.
14. ГОСТ 12.1.044-84. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
15. Бабкин В. С., Сеначин П. К., Крахтинова Т. В. ФГВ, 1982, 18, 6, 14.
16. Кудрявцев Е. А., Кривулин В. Н., Баратов А. И. и др. // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.— М.: ВНИИПО, 1982.
17. Вукалович М. И. Теплофизические свойства воды и водяного пара.— М.: Машиностроение, 1967.
18. Когарко С. М., Кушарин Ю. А., Лямин А. Г. и др. // Взрывобезопасность технологических процессов, пожаро- и взрывозащита оборудования и зданий.— Черкассы: ВНИИТБХП, 1985.

Поступила в редакцию 1/VII 1987,
после доработки — 12/IV 1988

УДК 534.46

О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Л. Б. Петухова, Т. В. Перегудова, В. А. Струнин, Г. Б. Манелис
(Черноголовка)

Степень зависимости скорости горения от давления определяется коэффициентом

$$\nu = \frac{\partial \ln u}{\partial \ln p} = \frac{p \partial u}{u \partial p} \approx \frac{p \Delta u}{u \Delta p} \quad (1)$$

В относительно узком интервале давлений ν считают постоянным и в этом случае зависимость $u(p)$ выражают степенным законом

$$u = b p^\nu,$$

где u — скорость горения; p — давление; b — константа. Вычисление ν проводят обычно спрямлением экспериментальных данных в логарифмических координатах с использованием метода наименьших квадратов. Однако в широком диапазоне давлений ν — переменная величина, тогда приходится делить этот диапазон на две или более области, в каждой из которых $\nu = \text{const}$. Естественно, что такой способ расчета ν не лишен субъективного произвола и определенной доли некорректности.

В математической теории горения, разработанной для случаев простых химических реакций, коэффициент ν связан элементарным образом с порядком реакции n [1]: $\nu = n/2$ ($\nu = 0,5$ для реакции первого порядка, $\nu = 1$ для реакции второго порядка). На практике же такие идеализиро-