

## ВЛИЯНИЕ УСКОРЕНИЯ НА ПРЕДЕЛЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ ПЛАМЕН

*В. Н. Кривулин, Е. А. Кудрявцев, А. Н. Баратов,  
А. М. Бадалян, В. С. Бабкин  
(Москва, Новосибирск)*

Особенность проблемы свободной конвекции в механизме гашения гомогенного газового пламени состоит в том, что ускорение  $\vec{g}$ , как векторная величина, может изменяться по отношению к вектору скорости пламени  $\vec{S}$  как по величине, так и по направлению. В зависимости от этого изменяются структура течения во фронте пламени, тепломассообмен зоны химической реакции и, как следствие, предельные условия существования стационарного пламени. При этом наибольший интерес на первом этапе представляют случаи одинаково и противоположно направленных векторов  $\vec{g}$  и  $\vec{S}$ . Эти два крайних случая традиционно выбираются как предположительные при изучении концентрационных пределов. Пределы определяются обычно в вертикальных трубах, а пламя распространяется или снизу вверх, или сверху вниз. Замечено, что область воспламенения при распространении пламени вверх, как правило, шире, чем при распространении вниз.

При распространении пламени в трубе против вектора ускорения (снизу вверх) движение газа в области пламени существенно неоднородно. В околопредельных смесях подъемные силы приводят к деформации фронта пламени в направлении распространения, увеличению общей площади фронта и скорости сгорания смеси. Условия гашения пламени в этом случае рассматривались в работах [1—4]. При распространении пламени по вектору ускорения подъемные силы, наоборот, стабилизируют положение фронта пламени. Последний движется вниз в форме слегка колеблющейся почти горизонтальной плоскости. Площадь поверхности фронта близка к сечению трубы. В ряде случаев наблюдается ячеистая структура пламени. Гашение пламени в этих условиях исследовалось в работах [5—9].

В настоящей работе исследовано влияние ускорения (величины и направления) на пределы распространения ряда гомогенных газовых пламен. Опыты проводились на установках двух типов (рис. 1). На установке типа I исследовались метано-, пропано- и аммиачно-воздушные смеси с относительно низкой нормальной скоростью пламени. Изменение величины ускорения на этой установке достигалось вращением вокруг горизонтальной оси стеклянной трубы, в которой визуально определялась способность пламени к распространению. Стеклянная труба с внутренним диаметром 3,6 см и длиной 15,5 см располагалась на центробежной машине по радиусу, причем геометрический центр трубы находился от оси вращения на расстоянии 22,5 см. Смеси газов готовились в отдельном смесителе по парциальным давлениям каждого компонента и использовались при начальных температуре 295 К и давлении 0,1 МПа. Чистота газов: метана — 99,65%  $\text{CH}_4$ , пропана — 99,95%  $\text{C}_3\text{H}_8$ , аммиака — 99,98%  $\text{NH}_3$ . Труба в статическом состоянии заполнялась приготовленной смесью и приводилась в движение. По достижении заданной постоянной угловой скорости вращения смесь поджигалась электрической искрой при разряде конденсатора или у ближнего к оси вращения конца трубы (распространение пламени по схеме сверху вниз) или у дальнего конца (распространение пламени снизу вверх). Энергия искры составляла ~30 Дж, искровой промежуток 5 мм. За критерий предела принималась способность пламени распространяться от места инициирования до геометрического центра сосуда.

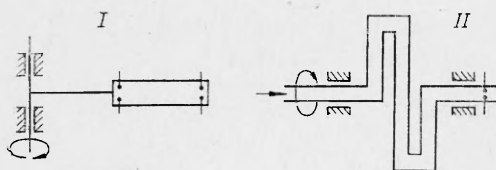


Рис. 1.

отверстия. Радиус петли составлял 7 см. В зависимости от скорости вращения пламя или распространялось по всей длине канала (наблюдался проскок пламени), или гасло (проскок отсутствовал). Для смеси заданного состава определялась минимальная скорость вращения, при которой пламя теряло способность распространяться через канал. Из рис. 1 видно, что на данной установке последовательно реализуются обе схемы распространения пламени: сверху вниз при движении пламени от оси вращения и снизу вверх при движении к оси вращения. Наиболее трудно преодолеваются участки петли, где пламя распространяется сверху вниз и где величина ускорения максимальна. Поэтому считалось, что пламя гаснет на краю петли канала при распространении сверху вниз. Учитывая, что область конвективного движения продуктов сгорания, ответственная за гашение пламени, располагается по всему радиусу петли, за предельное принималось значение перегрузки, среднее по радиусу.

### Распространение пламени по вектору ускорения

В табл. 1 приведены экспериментальные результаты по предельным перегрузкам —  $g/g_0$ , для исследуемых смесей ( $g_0$  — ускорение силы тяжести). Видно, что в случае метана и пропана для любой концентрации топлива в границах области распространения пламени при нормальных условиях существует предельная перегрузка, выше которой пламя не способно распространяться на весь объем сосуда. Максимальные значения перегрузок соответствуют смесям близ стехиометрического состава, имеющим наибольшие значения нормальной скорости пламени.

Механизм гашения пламени применительно к данному случаю рассматривался в работе [8], где показано, что роль свободной конвекции в гашении пламени может быть объяснена в рамках тепловой теории пределов Я. Б. Зельдовича. Конвекция, развивающаяся в продуктах сгорания за фронтом пламени, интенсифицирует процесс охлаждения продуктов и, таким образом, увеличивает теплопотери зоны пламени. При доминировании свободноконвективных теплопотерь в сложном теплообмене зоны пламени с окружающей средой асимптотическое условие предела имеет вид

$$\text{PeFr} = (0,14c)^3 (T_b^a - T_0) \beta / \text{Pr}, \quad (4)$$

где  $c = E(T_b^a - T_0) / R(T_b^a)^2$ ;  $\text{Pe}$ ,  $\text{Fr}$ ,  $\text{Pr}$  — числа Пекле, Фруда и Прандтля, отнесенные к продуктам сгорания;  $E$  — энергия активации;  $T_b^a$  — адиабатическая температура пламени;  $\beta$  — коэффициент объемного расширения.

В табл. 1 приведены экспериментальные и теоретические значения комплекса (4), пересчитанные на свежую смесь и адиабатическую нормальную скорость пламени. Для расчета коэффициента температуропроводности  $a$  брались термодинамические данные [10]. При выборе значений нормальной скорости  $S_u$  использовались экспериментальные данные [11—14] для метана, [15—16] для пропана и [11, 17] для водорода. Во всех расчетах энергия активации принималась равной 167,5 кДж/моль.

Таблица 1

Смесь	Топливо, %	g/g <sub>o</sub>	S <sub>u</sub> , см/с	a, см <sup>2</sup> /с	T <sub>b</sub> <sup>a</sup> , К	Re <sub>o</sub>	Re <sub>o</sub> Fr <sub>o</sub>	
							эксперимент	теория
СН <sub>4</sub> — воздух	5,8	1,0	8,0	0,214	1640	135	2,44	2,12
	7,0	17,0	19,0	0,214	1867	320	1,93	1,36
	8,0	48,7	28,4	0,214	2040	478	2,24	0,99
	9,0	84,6	36,4	0,214	2182	612	2,71	0,78
	10,0	84,6	40,0	0,214	2228	673	3,60	0,72
	11,0	55,5	33,5	0,214	2150	564	3,23	0,82
	12,0	14,5	23,0	0,214	2065	387	4,00	0,95
	13,2	1,0	10,0	0,214	1950	168	4,76	1,17
С <sub>2</sub> H <sub>6</sub> — воздух	2,4	1,0	9,8	0,205	1660	172	4,70	2,04
	3,0	29,1	27,0	0,203	1914	478	3,39	1,24
	4,0	130,6	43,3	0,201	2238	777	3,16	0,71
	5,0	96,8	38,0	0,198	2165	691	2,92	0,80
	6,0	8,15	17,0	0,195	1828	315	3,15	1,46
	7,0	1,0	8,0	0,192	1550	150	2,71	2,57
	Н <sub>2</sub> — воздух	15,0	106	40	0,275	1490	116	2,24
17,5		330	60	0,286	1680	168	2,34	2,26
20,0		802	80	0,295	1850	217	2,21	1,62
22,5		1614	100	0,297	2005	270	2,13	1,24
25,0		3388	130	0,312	2160	333	2,12	0,96

Из табл. 1 видно, что во всем диапазоне перегрузок комплекс  $(Re_o Fr_o)_{\text{эксп}}$  для трех топлив имеет приблизительно постоянное значение, близкое к среднему  $\langle Re_o Fr_o \rangle_{\text{эксп}} = 2,95$ , и удовлетворительно согласуется с расчетным значением  $\langle Re_o Fr_o \rangle_{\text{теор}} = 1,42$ . При этом нужно учесть приближенный характер соотношения (1) и его высокую чувствительность (как куб) к определяющим параметрам.

Что касается аммиака, то известно, что при нормальных условиях аммиачно-воздушные пламена не распространяются сверху вниз в вертикальных трубах диаметром 5 и 7,5 см даже в смесях стехиометрического состава [18]. Поскольку критический диаметр для стехиометрической смеси в этих условиях составляет, по данным [19], около 1,2 см, а значение числа Пекле для трубы  $d = 7,5$  см, равное 264, почти на порядок превышает критическое значение  $Re_{кр} = 36$ , можно предположить, что из-за низких значений нормальной скорости данная газовая система находится под конвективным пределом.

Действительно, при повышенных начальных температурах, а следовательно, и  $S_u$ , пламена аммиака распространяются вниз [18]. Предельные условия, соответствующие экспериментальным данным [18], приве-

Таблица 2

NH <sub>3</sub> , %	T <sub>o</sub> , К	S <sub>u</sub> , см/с	a, см <sup>2</sup> /с	T <sub>b</sub> <sup>a</sup> , К	Re <sub>o</sub>	Re <sub>o</sub> Fr <sub>o</sub>	
						эксперимент	теория
17,8	523	10,5	0,620	1910	85	1,91	1,33
19,9	413	10,4	0,399	1950	131	2,90	1,24
21,0	363	9,4	0,313	1970	149	2,67	1,15
22,1	343	9,3	0,282	2000	165	2,93	1,06
23,3	343	9,6	0,282	1940	170	3,19	1,16
24,6	363	10,3	0,312	1890	165	3,52	1,27
26,3	413	11,3	0,394	1860	144	3,75	1,36
28,2	523	10,8	0,607	1860	89	2,13	1,32

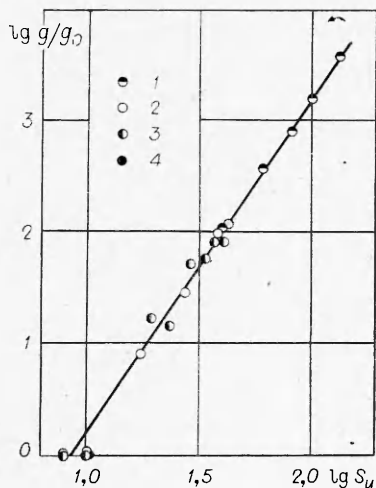


Рис. 2.

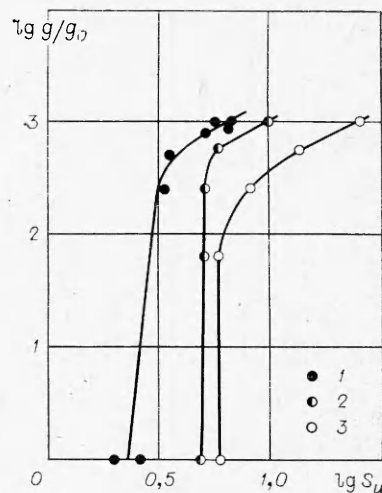


Рис. 3.

дены в табл. 2. Для определения  $S_u$  и  $a$  при различных температурах использовались данные [19] и температурные зависимости  $S_u \sim T_0^2$  и  $a \sim T_0^{1,85}$ . Из таблицы видно, что значение комплекса  $(\text{Pe}_0 \text{Fr}_0)_{\text{эксп}}$  приблизительно постоянно для всех предельных составов, близко к значениям, полученным для метана, пропана и водорода, и удовлетворительно согласуется с теоретическим:  $\langle \text{Pe}_0 \text{Fr}_0 \rangle_{\text{эксп}} = 2,88$ ,  $\langle \text{Pe}_0 \text{Fr}_0 \rangle_{\text{теор}} = 1,23$ . Таким образом, экспериментальные данные [18] можно рассматривать как конвективный предел распространения пламени по температуре.

Поскольку в описываемых опытах нормальная скорость пламени и предельная перегрузка являются наиболее изменяющимися параметрами, представляет интерес выявить зависимость между ними. На рис. 2, 1—4 приведена эта зависимость для водорода, пропана, метана и аммиака соответственно (распространение пламени сверху вниз). Видно, что в соответствии с формулой (1) она хорошо описывается соотношением  $S_{ul} \sim (g/g_0)^{1/3}$ . Из рисунка также видно, что в нормальных условиях пламени, имеющие нормальные скорости меньше 8—9 см/с, не могут распространяться по вектору ускорения в режиме свободноконвективного теплообмена, если отсутствуют причины, вызывающие увеличение эффективной скорости сгорания за счет, например, турбулизации свежей смеси.

### Распространение пламени против вектора ускорения

Опыты этой серии проводились на установке I (см. рис. 1) при поджигании смеси у дальнего от оси вращения конца трубки. Результаты по предельным перегрузкам для воздушных смесей метана, пропана и аммиака приведены в табл. 3. Из-за технических ограничений установки опыты с метаном и пропаном выполнены только вблизи концентрационных пределов. Таблица показывает, что гашение пламен, распространяющихся против вектора ускорения, происходит при более высоких значениях перегрузки, чем для пламен, распространяющихся по вектору ускорения. Это указывает на существенное различие в процессах.

В настоящее время отсутствуют ясные физические представления о механизме распространения и гашения пламени в рассматриваемом случае. Не известны поведение пламени в условиях перегрузки, его форма, структура, линейная скорость движения, стабильность. Отсутствуют сведения о зависимости скорости горения и условий теплообмена от ве-

Таблица 3

CH <sub>4</sub> , %	g/g <sub>0</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , %	g/g <sub>0</sub>	NH <sub>3</sub> , %	g/g <sub>0</sub>
5,1	1	2,1	1; 63	17,4	1
5,3	63; 252	2,3	252	18,0	252
5,5	566	2,6	566	20,0	815
6,0	1007	2,8	960	22,0	910
12,8	1007	8,2	1007	24,0	1007
13,0	556	8,6	566	26,0	1007
13,2	252	8,8	252	28,0	493
14,0	63	9,0	63	29,6	1
14,3	1	9,2	1	—	—

личины перегрузки. Существенное значение в данном случае должны иметь стадия формирования и подъема очага пламени после зажигания смеси, деформация пламени, взаимодействие со стенкой и другие факторы. Существующие гипотезы о конвективном механизме гашения пламени в поле массовых сил весьма противоречивы. Согласно [2], гашение пламени должно наблюдаться, когда скорость распространения по трубе станет меньше скорости конвективного подъема продуктов сгорания, равной  $0,328\sqrt{gd}$ . По гипотезе [4] нормальная скорость на пределе  $S_{ul} \sim g^{1/3}$ .

На рис. 3, 1—3 приведена зависимость предельной перегрузки от нормальной скорости пламени воздушных смесей аммиака, метана и пропана соответственно (распространение пламени снизу вверх). Видно, что эта зависимость в широком диапазоне перегрузок не может быть представлена единой формулой  $S_{ul} \sim g^k$ . При  $g/g_0 = 1 \div 100$  предельная перегрузка слабо зависит от нормальной скорости и  $k \approx 0 \div 0,1$ . Наоборот, в области  $g/g_0 = 100 \div 1000$  наблюдается сильная зависимость перегрузки и  $k \approx 1$ . При детальной интерпретации полученных результатов необходимы, во-первых, более надежные, чем имеющиеся в литературе, данные по нормальным скоростям в области малых перегрузок, где абсолютные значения  $S_u$  низки, и, следовательно, возможно осложняющее влияние кондуктивных теплопотерь. Во-вторых, желательно расширение диапазона перегрузок в область высоких значений  $g/g_0$ , где значение  $S_u$  достаточно хорошо известно.

Поступила в редакцию  
10/IV 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М., Мир, 1968.
2. A. Levy. Proc. Roy. Soc. (London). 1965. 283A, 134.
3. В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев и др.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972.
4. M. Hertzberg. The Theory of Flammability Limits. Natural Convection. RI 8127, Washington, US Bureau of Mines, 1976.
5. В. С. Бабкин, А. В. Вьюн.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972.
6. В. С. Бабкин, Л. А. Ловачев и др.— В сб.: Горючесть веществ и химические средства пожаротушения. М., ВНИИПО, 1973.
7. V. S. Babkin, V. I. Babushok et al. Archivum Thermodynamic i Spalania, 1975. 6. 1, 101.
8. В. С. Бабкин, А. М. Бадалян, В. В. Никулин.— В сб.: Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка. 1977.
9. S. Crescitelli, G. Russo et al. Combust. Sci. Techn., 1977, 15, 201.
10. Н. В. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз. 1963.
11. T. G. Scholte. P. V. Vaags. Combust. and Flame, 1959, 18. 4, 495.
12. A. Egerton, S. K. Thabet. Proc. Roy. Soc. (London), 1952, A211, 445.

13. H. Edmondson, M. P. Heap., R. Pritchard. *Combust. and Flame*, 1970, 14, 2, 195.
14. R. Günter, G. Janisch. *Combust. and Flame*, 1972, 19, 1, 49.
15. J. Powling. *J. Fuel*, 1949, 28, 25.
16. Основы горения углеводородных топлив. Под ред. Л. И. Хитрина и В. А. Попова. М., ИЛ, 1960.
17. А. И. Розловский. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М., Химия, 1972.
18. A. G. White. *J. Chem. Soc.*, 1922, 121, 1688.
19. В. Ф. Заказов, Л. А. Куршева, З. И. Федина. *ФГВ*, 1978, 14, 1, 22.

## РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ГАЗОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛА И КАПЕЛЬ ВОДЫ

*Л. И. Иванничева, А. М. Степанов*  
(Ленинград)

Теоретически исследуется возможность стационарного самоподдерживающегося горения газозвеси частиц металла (горючего) и капель воды (окислителя). Ранее аналогичное исследование выполнено для более простых газодисперсных систем. В работе [1], например, рассмотрены закономерности распространения пламени по взвеси частиц углерода в газообразном окислителе; в [2] разработана модель пламени, распространяющегося по взвеси углеводородных капель, однако также в газообразном окислителе.

### Расчетная модель

В направлении оси  $x$  (из  $x = -\infty$ ) движется одномерный поток газоносителя, в котором взвешены металлические частицы и капли воды. Взвеси частиц и капель считаются монодисперсными. Поскольку в исходной смеси газообразного окислителя нет или его содержание невелико (именно такие системы представляют особый практический интерес), пламя распространяется в квазигомогенном режиме горения (см. [2]), т. е. микропламени вблизи частиц металла фактически нет. Иначе говоря, химическая реакция идет только в газовой фазе; образуются газообразный и конденсированный окислы. Последний присутствует в виде мельчайших частичек сферической формы и известного, например из экспериментов [3, 4], размера; в конкретных вариантах расчета этот размер варьировался. Температура частичек окисла из-за их малости полагается равной температуре газа. Скорости движения конденсированной и газообразной фаз считаются одинаковыми. Состав газа определяется локальным (по  $x$ ) химическим и фазовым равновесием; учитывается диссоциация окисла и водяного пара. Не учитывается тепло- и массообмен газозвеси с окружающей средой. Разогрев холодной газозвеси осуществляется за счет тепла реакции, переданного из зоны пламени теплопроводностью по газу и излучением от воспламенившихся частиц металла и частичек конденсированного окисла. Газ и капли воды оптически прозрачны; испускают, поглощают и рассеивают излучение только конденсированные металлы и окисел. Нормальная скорость пламени — это та скорость перемещения исходной газозвеси, при которой возможны стационарные распределения температуры, концентраций реагентов и характеристик излучения вдоль  $x$ .

С учетом сделанных выше допущений уравнение теплового баланса для газозвеси имеет вид

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + q_R + g \sum_j n_j i_j + g_M i_M + g_V i_V + g_{OK} i_{OK} = g^0 \sum_j n_j^0 i_j^0 + g_M^0 i_M^0 + g_b^0 i_b^0. \quad (1)$$