

$h = 40$ м). Эти опыты подтвердили, что в условиях невесомости диффузионное пламя бутилового спирта полностью гаснет через 0,8—1,2 сек за счет израсходования кислорода в зоне реакции. Повторное воспламенение, видимое как «самовоспламенение» фитиля спиртовки, происходит в тех случаях, когда поле температур в зоне, где проходит реакция горения за счет кондуктивной теплопроводности смеси газов и термодиффузии без конвекции, не успевает выравняться с окружающим пространством, а температура среды в этой зоне не успевает снизиться ниже температуры поджигания паровоздушной смеси бутилового спирта.

Таким образом, экспериментально доказана невозможность существования открытого диффузионного пламени в условиях невесомости (при исчезновении естественной конвекции газов), а также подтвержден механизм гашения диффузионного пламени в этих условиях за счет «кислородного голодания» в зоне реакции горения.

УДК 536.46

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Г. Д. Саламандра

(Москва)

Взросший в последние годы интерес к физическим методам воздействия на процесс горения обусловлен как задачами, связанными с генерированием электроэнергии при движении ионизированного газа в магнитном поле, так и проблемами, поставленными ракетной техникой.

Работа посвящена исследованию особенностей распространения пламени в поперечном электрическом поле. Исследовалось влияние электрического поля на структуру и скорость распространения пламени в горизонтальной трубе, наполненной метано-воздушной смесью, содержащей 10% CH_4 и 90% воздуха, при поджигании смеси у открытого конца трубы.

Использованная методика (скоростная съемка методом Теплера, включающая в себя получение цветных теплерограмм на приборе ИАБ-451, визуализация движения газа перед фронтом пламени) позволила получить более полную информацию о влиянии электрического поля на процесс горения.

Опыты проводились в трубе квадратного сечения 36×36 мм², изготовленной из органического стекла, длиной 600 мм. Поперечное электрическое поле создавалось между латунными пластинами размером 450×60 мм², смонтированными в тело трубы на расстоянии 60 мм друг от друга. Один конец трубы закрывался фланцем, на котором крепился вентиль для откачки из трубы воздуха и наполнения ее горючей смесью. Второй конец трубы закрывался пленкой, которая непосредственно перед опытом удалялась, обеспечивая свободный выход продуктов реакции в атмосферу. Процесс распространения пламени регистрировался через оптические стекла длиной 200 мм, установленные таким образом, что можно было просматривать все сечение трубы. Фотогра-

фическая регистрация осуществлялась на двух участках: на расстоянии 80—280 мм и 280—480 мм от места зажигания.

Для визуализации движения газа перед фронтом пламени использовался разработанный нами метод создания в горячей среде искусственных оптических неоднородностей, по перемещению которых можно судить о скорости газа перед фронтом пламени [1, 2]. Тонкая нихромовая проволока, разряд конденсатора через которую обеспечивал создание искусственной оптической неоднородности, натягивалась по оси трубы. Один конец ее закреплялся на фланце, а второй проходил через планку, не нарушая герметичности системы, и крепился вне трубы при помощи специального устройства, обеспечивающего необходимое натяжение проволоки.

Процесс распространения пламени регистрировался скоростной камерой СКС-1 с частотой около 3000 кадр/сек. Осуществлялась регистрация процесса при двух взаимно перпендикулярных положениях ножа. Наряду с черно-белыми теплогограммами были получены цветные теплогограммы фронта пламени, распространяющегося в поперечном электрическом поле.

Методика получения цветных теплогограмм на приборе ИАБ-451 описана нами в работах [3, 4]. Источниками света при съемке служили ртутная (для получения черно-белых теплогограмм) и ксеноновая (для получения цветных теплогограмм) лампы высокого давления мощностью 1000 вт.

В качестве источников высокого напряжения использовались аппарат для испытания пробоя кабелей АКИ-50 (источник высокого напряжения отрицательной полярности) и высоковольтный выпрямитель «Тесла» (источник высокого напряжения положительной полярности). Максимальная величина напряженности поперечного электрического поля составляла 18,6 кВ/см.



Рис. 1. Теплогограммы фронта пламени, полученные при вертикальном положении ножа.

a — без поля; *b* — напряжение на верхней пластине — 20 кВ, нижняя пластина заземлена; *v* — напряжение на нижней пластине — 12,4 кВ, верхняя пластина заземлена; *z* — напряжение на верхней пластине — 20 кВ, напряжение на нижней пластине +20 кВ.

Опыты проводились при следующих вариантах наложения электрического поля: 1) напряжение отрицательной полярности на верхней пластине; нижняя пластина заземлена; 2) верхняя пластина заземлена; напряжение отрицательной полярности на нижней пластине; 3) напряжение отрицательной полярности на верхней пластине, положительной — на нижней пластине.

На рис. 1, 2 представлены теплогограммы процесса распространения пламени в горизонтальной трубе, наполненной метано-воздушной смесью. Моментальные фотографии фронта пламени следуют через 5×10^{-3} сек.

При поджигании смеси у открытого конца трубы фронт пламени имеет несимметричный относительно оси трубы вид: верхняя часть пламени выдвинута в направлении его движения (см. рис. 1, *а*). Под влиянием поперечного электрического поля передняя точка пламени перемещается к пластине, находящейся под высоким напряжением (см. рис. 1, *б, в*). Области фронта пламени, прилегающие к заземленной пластине, характеризуются малыми градиентами показателя пре-

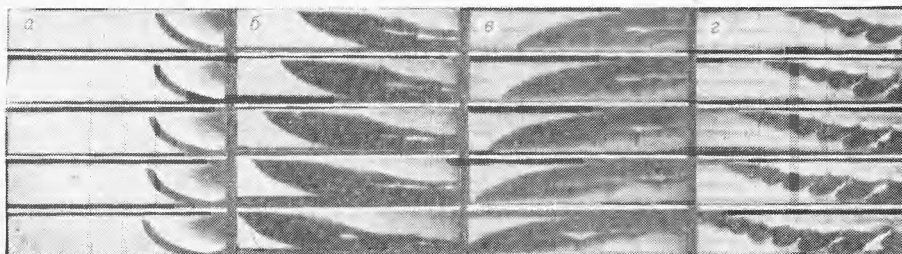


Рис. 2. Теплерограммы фронта пламени, полученные при горизонтальном положении ножа.

а — без поля; *б* — напряжение на верхней пластине — 30 кВ, нижняя пластина заземлена; *в* — напряжение на нижней пластине — 30 кВ, верхняя пластина заземлена; *г* — напряжение на верхней пластине — 20 кВ, напряжение на нижней пластине +20 кВ.

ломления, о чем свидетельствуют слабо выраженные контуры фронта пламени на теплерограммах процесса, полученных при вертикальном положении ножа (см. рис. 1, *б*). Контуры пламени тем слабее, чем больше напряженность электрического поля. Поверхность пламени возрастает как за счет сильного вытягивания фронта пламени, так и в результате появления «складок» на его поверхности. Последние отчетливо видны при визуализации градиентов показателя преломления поперек трубы (см. рис. 2, *б, в*).

Опыты, в которых высокое напряжение подводилось к нижней пластине, показали, что до тех пор, пока разность потенциалов оставалась меньше некоторой величины, названной нами критической, передняя точка фронта пламени оставалась вблизи верхней стенки трубы.

При разности потенциалов больше критической величины она перемещалась к нижней стенке трубы. Критическая разность потенциалов в наших опытах составляла ≈ 12 кВ. Опыты, проведенные при критической разности потенциалов, показали, что полная перестройка фронта пламени занимает около 0,1 сек.

Рисунки 1, *г* и 2, *г* дают представление о структуре фронта пламени в том случае, когда на обе пластины подается высокое напряжение. Хорошо видна периодическая структура фронта пламени, становящаяся более отчетливой с ростом разности потенциалов. Неоднородности, возникающие на поверхности пламени, распространяются с постоянной скоростью в направлении, обратном направлению распространения пламени. Цветные теплерограммы свидетельствуют о том, что фронт пламени, распространяющийся в поперечном электрическом поле, представляет сложное образование с правильно чередующимися областями больших и малых градиентов показателя преломления. Это в равной мере относится к градиентам показателя преломления вдоль и поперек трубы.

Из приведенных выше теплерограмм видно, что при любом варианте наложения электрического поля скорость распространения пламени возрастает, оставаясь постоянной на всем просматриваемом участке

трубы. Зависимость скорости равномерного распространения пламени от разности потенциалов представлена на рис. 3.

На графике приняты следующие обозначения: опыты, соответствующие первому варианту наложения поля, обозначены треугольниками, второму — кружками, третьему — квадратиками. Светлые точки характеризуют скорость распространения пламени на расстоянии 80—280 мм от места зажигания. Зачерненные точки дают представле-

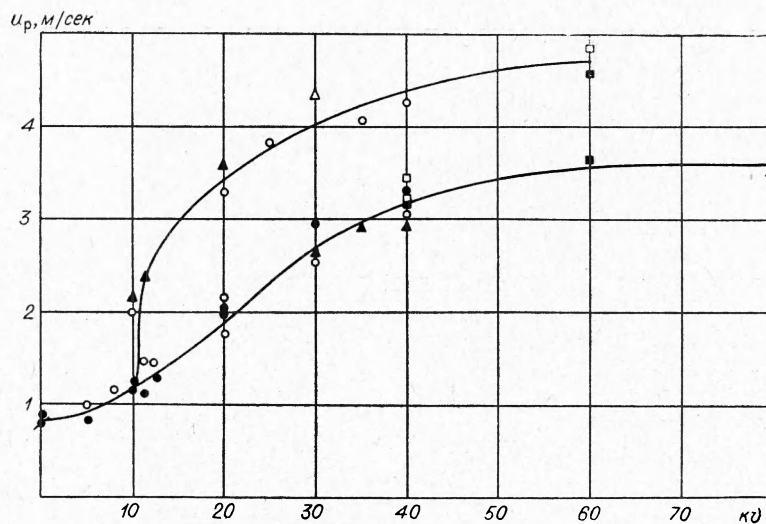


Рис. 3. Зависимость скорости равномерного распространения пламени от разности потенциалов.

ние о скорости распространения пламени на следующих 200 мм трубы. Две кривые соответствуют двум наблюдаемым экспериментально скоростям равномерного распространения пламени в поперечном электрическом поле.

Рассмотрим, чем обуславливается распространение пламени с постоянной скоростью в горизонтальной трубе, наполненной горючей смесью, при поджигании у открытого конца трубы. Поскольку продукты реакции имеют возможность свободно выходить в атмосферу, давление газа перед фронтом пламени практически не изменяется. Свежая смесь перед фронтом пламени в целом неподвижна. Однако газ в непосредственной близости к фронту пламени движется. Скорость газа в различных точках фронта пламени различна. Это следует из соотношения

$$u_p = \frac{u_n}{\sin \alpha} + W, \quad (1)$$

связывающего скорость равномерного распространения пламени u_p с нормальной скоростью пламени u_n , углом наклона фронта пламени α и осевой составляющей скорости движения газа перед пламенем W . При данной скорости распространения пламени фронт пламени принимает такую форму, при которой скорость всех его точек равна скорости быстрой точки [5]. Под влиянием электрического поля может измениться нормальная скорость распространения пламени. Электрическое поле может изменить распределение скоростей перед фронтом пламени. Наконец, оба эти фактора могут действовать одновременно.

Скорость равномерного распространения пламени связана с величиной нормальной скорости пламени соотношением

$$u_p = \frac{u_n \cdot S_{пл}}{S_{тр}}, \quad (2)$$

где $S_{пл}$ — величина поверхности пламени, а $S_{тр}$ — площадь поперечного сечения трубы.

Оценка влияния электрического поля на нормальную скорость распространения пламени в предположении, что поверхность пламени пропорциональна длине линии l , ограничивающей регистрируемый на теплеграмме фронт пламени, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Условия проведения опыта	Скорость равномерного распространения пламени, м/сек	l , мм	$\frac{u_p}{u_{p0}}$	$\frac{l}{l_0}$
Без поля	0,87	63,5	1	1
Напряжение на верхней пластине 10 кв	1,41	102,4	1,62	1,62
Нижняя пластина заземлена				
Верхняя пластина заземлена	1,13	79	1,3	1,25
Напряжение на нижней пластине: 8 кв				
10 кв				
12 кв	1,21	87,5	1,39	1,38
	1,46	109	1,68	1,72

Естественно, анализировались только те теплеграммы, на которых не было зафиксировано увеличение поверхности пламени за счет появления «складок». Это сократило область рассмотренных нами напряженностей электрического поля до величины 2,8 кв/см. Из таблицы видно, что скорость равномерного распространения пламени под влиянием поперечного электрического поля растет пропорционально увеличению поверхности пламени. Вероятно, электрическое поле не влияет на величину нормальной скорости пламени. Увеличение скорости распространения пламени в электрическом поле обусловлено усилением движения газа перед фронтом пламени. Табл. 2 характеризует изменение распределения скоростей газа перед фронтом пламени под влиянием электрического поля. Величина нормальной скорости распространения пламени принята равной 0,36 м/сек. Движение газа в направлении распространения фронта пламени соответствует положительному значению величины W .

Из таблицы видно, что в том случае, когда напряжение приложено к верхней пластине, распределение скоростей перед фронтом пламени имеет тот же характер, что и в отсутствие электрического поля: в верхней части трубы направления движения газа и фронта пламени совпадают. В нижней части трубы газ движется навстречу фронту пламени. Под влиянием электрического поля увеличиваются лишь абсолютные значения скоростей газа перед фронтом пламени за счет наложения на циркулярное движение газа, обусловленное действием силы тяжести, движения газа, вызванного поперечным электрическим полем. При изменении направления элект-

Из таблицы видно, что в том случае, когда напряжение приложено к верхней пластине, распределение скоростей перед фронтом пламени имеет тот же характер, что и в отсутствие электрического поля: в верхней части трубы направления движения газа и фронта пламени совпадают. В нижней части трубы газ движется навстречу фронту пламени. Под влиянием электрического поля увеличиваются лишь абсолютные значения скоростей газа перед фронтом пламени за счет наложения на циркулярное движение газа, обусловленное действием силы тяжести, движения газа, вызванного поперечным электрическим полем. При изменении направления элект-

Таблица 2

Расстояние от нижней стенки трубы, мм	Скорость газа (м/сек) под влиянием электрического поля		
	без поля	напряжение на верхней пластине 10 кв. Нижняя пластина заземлена	напряжение на нижней пластине 12,4 кв. Верхняя пластина заземлена
4	-0,29	-0,56	1,07
8	-0,16	-0,48	0,97
12	0,34	0,36	0,82
16	0,40	0,59	0,71
20	0,45	0,71	0,54
24	0,45	0,86	0,13
28	0,50	0,99	-1,16
32	—	1,05	-1,16

При изменении направления элект-

