

Рис. 3. Зависимость максимального значения электрического потенциала от коэффициента избытка воздуха.  
1 — пропан-бутан; 2 — метан.

ния. Области положительного потенциала тяготеют к участкам, где высокий химический потенциал смеси сочетается с наличием в ней свободного кислорода. Здесь наблюдаются и наибольшие градиенты потенциала. Отмечено увеличение развития областей положительного потенциала вдоль внутренних границ зоны активного горения при уменьшении этих областей у наружных границ по мере увеличения коэффициента избытка воздуха в смеси (см. рис. 1, 2).

По сравнению с метаном электрическое поле пламени пропан-бутана более насыщенно, увеличиваются градиенты потенциала по сечению, растут его абсолютные значения (рис. 3).

Наблюдаемая локализация положительных и отрицательных потенциалов является следствием процессов, происходящих во фронте реакции с заряженными частицами разных знаков. Продиффундировавшие в свежую смесь (или к внешним границам пламени) электроны, возникшие при хемиионизации, захватываются молекулами кислорода (при достаточном парциальном давлении) с образованием отрицательных ионов  $O_2^-$ . Подвижность отрицательных частиц уменьшается. Вследствие этого положительные ионы с массой, меньшей, чем у иона  $O_2^-$ , разлетаются на большие расстояния, чем отрицательные. Отсутствие областей положительных зарядов во внутренних зонах диффузионных пламен и пропорциональность концентрации кислорода в смеси (см. рис. 2, 3), по-видимому, подтверждают подобный механизм локализации потенциалов различных знаков.

Поступила в редакцию 21/XI 1976,  
после доработки — 1/III 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Энгель. Ионизованные газы. М., Физматгиз, 1959.
2. Р. М. Фристром, А. А. Вестенберг. Структура пламени. М., «Металлургия», 1969.
3. Б. С. Фиалков, В. Т. Плицын. Кинетика движения и характер горения кокса в доменной печи. М., «Металлургия», 1971.
4. Б. С. Фиалков, В. Т. Плицын и др. ФГВ, 1971, 7, 3.
5. Е. М. Степанов, Б. Г. Дьячков. Ионизация в пламени и электрическое поле. М., «Металлургия», 1968.
6. Г. Д. Саламандра. Фотографические методы исследования быстропротекающих процессов. М., «Наука», 1974.
7. Н. А. Исаев. — В сб.: Физика горения и методы ее исследования. Вып. 2. Чебоксары, ЧувГУ, 1972.

### НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Г. Д. Саламандра, Н. И. Майоров

(Москва)

Под влиянием поперечного электрического поля фронт пламени, распространяющийся в горизонтальной трубе, наполненной медленно горящей топливно-воздушной смесью, растягивается. На его поверх-

ности возникают возмущения типа «бегущих волн» [1—3]. Поверхность пламени увеличивается, растет скорость его распространения.

В данной статье описаны результаты экспериментального исследования влияния электрического поля на форму и структуру пламени и скорость их распространения в сухих и влажных метано-воздушных смесях.

Опыты проводились в горизонтальных трубах из стеклопластика АГ-4С с изолированными электродами [3]. Напряжение отрицательной полярности подавалось на верхний электрод. Нижний электрод заземлялся. Максимальная разность потенциалов равнялась 30 кВ. Горючая смесь составлялась динамическим способом. Для ее осушки использовался ангидрон. Необходимая дозировка водяных паров в смеси обеспечивалась пропусканием ее через водный раствор глицерина заданной концентрации. Максимальная влажность смеси составляла 2,4%.

Поскольку стеклопластик, из которого изготовлена труба, как и всякий неметаллический материал, способен поглощать и отдавать влагу, в серии опытов с сухими смесями предусматривалась тщательная осушка трубы перед наполнением ее горючей смесью. В опытах с влажными смесями стенки трубы предварительно увлажнялись до значения, близкого к влажности смеси. Состав и влажность смеси контролировались интерферометрами Релея. Абсолютная ошибка в измерении процентного содержания горючего не превышала 0,03%, влажности — 0,06%.

Чтобы исключить влияние на фронт пламени волн конечной амплитуды, генерируемых в процессе сгорания, и связанного с их распространением движения газа, был выбран наиболее простой режим горения — распространение пламени с постоянной скоростью. Такой режим реализуется при поджигании смеси у открытого конца полузамкнутой трубы.

Процесс распространения пламени, визуализированный методом Теплера, регистрировался скоростной съёмочной камерой с частотой 3000—4000 кадр/с.

#### Растяжение фронта пламени в электрическом поле

Фронт пламени, распространяющийся в горизонтальной трубе, в отсутствие электрического поля имеет характерную менискообразную форму: передняя точка ее выдвинута вперед в направлении движения пламени. Такая форма фронта пламени обусловлена действием силы тяжести. Вытянутость фронта пламени  $H_0$  (расстояние между его передней и задней точками в направлении оси трубы) зависит от состава горючей смеси, режима сгорания и конструктивных особенностей трубы. В бедных метано-воздушных смесях величина  $H_0$  значительно больше, чем в богатых смесях. От содержания влаги в смеси она зависит очень слабо. Приняв вытянутость фронта пламени в отсутствие электрического поля за единицу, будем характеризовать относительное растяжение пламени в электрическом поле величиной  $H/H_0$ . Максимальное растяжение пламени зависит от состава смеси. При изменении содержания метана в смеси от 7 до 13% величина  $H_{\max}/H_0$  монотонно возрастает от 3,2 до 5,1:

$\text{CH}_4$ %	7	8	9	10	11	12	13
$H_{\max}/H_0$	3,2	3,2	3,4	3,7	4,1	4,6	5,1

Присутствие влаги в смеси оказывает стабилизирующее действие на фронт пламени. При небольшой разности потенциалов вытянутость пламени во влажной смеси значительно меньше, чем в сухой. Однако

при разности потенциалов, превосходящей величину, при которой в сухой смеси прекращается дальнейшее растяжение пламени, вытянутость фронта пламени во влажной смеси может достигать величины  $H_{\max}$  для сухой смеси.

Растяжение пламени в электрическом поле можно объяснить, полагая, что электрическое поле действует аналогично гравитационному полю. Известно [4, 5], что под влиянием достаточно сильных электрических полей в пламенах в отличие от обычной низкотемпературной плазмы возможно разделение зарядов. Это приводит к образованию объемного заряда между фронтом пламени и соответствующим электродом. Сила, действующая на единицу объема нейтрального газа, равна плотности тока, деленной на подвижность носителя заряда.

Оценка величины объемной силы, действующей на газ при плотностях тока, близких к плотностям тока насыщения, показала, что сила, обусловленная действием электрического поля, на два порядка превосходит силу, вызванную действием поля тяжести [4]. Поскольку фронт пламени, распространяющийся в горизонтальной трубе, наполненной медленно горящей смесью, под влиянием силы тяжести приобретает несимметричный относительно оси трубы вид, то под влиянием большей силы он может растягиваться в несколько раз. Растяжение пламени в электрическом поле вызвано изменением распределения скоростей газа вблизи фронта пламени: возрастает горизонтальная составляющая скорости свежей смеси в верхней части трубы. За фронтом пламени, где циркуляционное движение накладывается на движение продуктов реакции в сторону открытого конца трубы, увеличивается угол между вектором скорости и осью трубы [6].

### Волнообразование на поверхности пламени

Растяжение фронта пламени в электрическом поле сопровождается появлением возмущений на его поверхности. Они становятся особенно заметными, когда искажают гладкую в отсутствие поля поверхность, ограничивающую фронт пламени.

Анализ теплеграмм пламен, распространяющихся в различных метано-воздушных смесях, показал, что в бедных смесях процесс волнообразования идет интенсивнее, чем в богатых. Критерий для строгой количественной оценки этого процесса отсутствует. Сравнительные данные можно получить, сопоставляя величины разностей потенциалов, при которых в различных смесях начинает искажаться гладкий в отсутствие поля контур фронта пламени. Опыты показали, что если в бедной смеси (7%  $\text{CH}_4$ ) заметное искривление отдельных участков фронта пламени начинается при разности потенциалов 12 кВ, то для того, чтобы вызвать появление возмущений на поверхности пламени в богатой смеси (13%  $\text{CH}_4$ ), необходимо приложить в два раза большую разность потенциалов. Увеличение влажности смеси способствует сглаживанию возмущений на поверхности пламени (рис. 1). Фронт пламени, распространяющийся в стехиометрической смеси, содержащей больше 1,7%  $\text{H}_2\text{O}$ , даже при достаточно большой разности потенциалов остается гладким.

Возникая в головной части фронта пламени, возмущения перемещаются по поверхности пламени в направлении, обратном направлению его распространения (рис. 2). Обращает на себя внимание, что расстояния между соседними углублениями, образованными возмущениями на поверхности пламени, увеличиваются. Растет и скорость перемещения возмущений. Анализ кинематографического материала показал, что процесс возникновения возмущений носит периодический

характер. Величина «периода»  $\tau$  является функцией состава горючей смеси, содержания влаги в ней и разности потенциалов. Так, при  $U=16$  кВ в сухой стехиометрической метано-воздушной смеси  $\tau \approx 7 \cdot 10^{-3}$  с. Во влажных смесях промежуток времени между появлением двух последующих возмущений в головной части фронта пламени увеличивается. При влажности, например, 1,7% при прочих равных условиях  $\tau$  на порядок больше, чем в сухой смеси.

Для удобства нахождения количественных соотношений, связывающих скорость перемещения возмущения по поверхности пламени с его основными параметрами, воспользуемся терминами, принятыми при описании волн.

Скоростью перемещения возмущения  $v^*$  будем называть скорость перемещения его гребня, длиной волны  $\lambda$  — расстояние между соседними углублениями, образованными возмущениями на поверхности пламени. Местоположение возмущения на поверхности пламени будем характеризовать расстоянием  $h$  от верхней стенки трубы до границы невозмущенного контура пламени, полученного усреднением нескольких контуров, зарегистрированных на теплереограммах пламени в близкие между собой моменты времени.

Проследим за возмущениями 1, 2 рис. 2. Видно, что по мере их перемещения величины  $\lambda$  и  $v^*$  растут. Анализ количественных данных, связывающих величины  $v^*$ ,  $\lambda$ ,  $h$  и скорость равномерного ра-

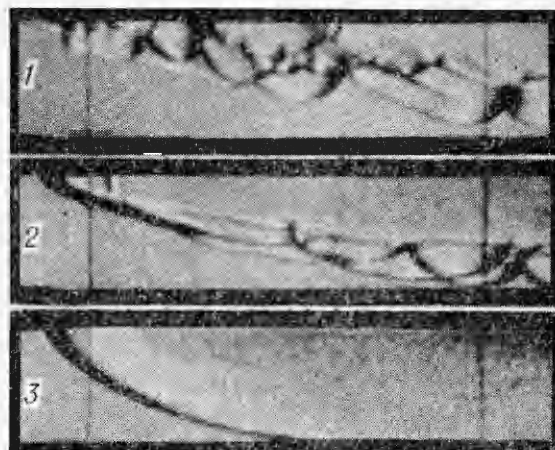


Рис. 1. Теплереограммы фронтов пламени при разности потенциалов 30 кВ.

1 — сухая смесь; 2 — 1,6%  $H_2O$ ; 3 — 2,4%  $H_2O$ .

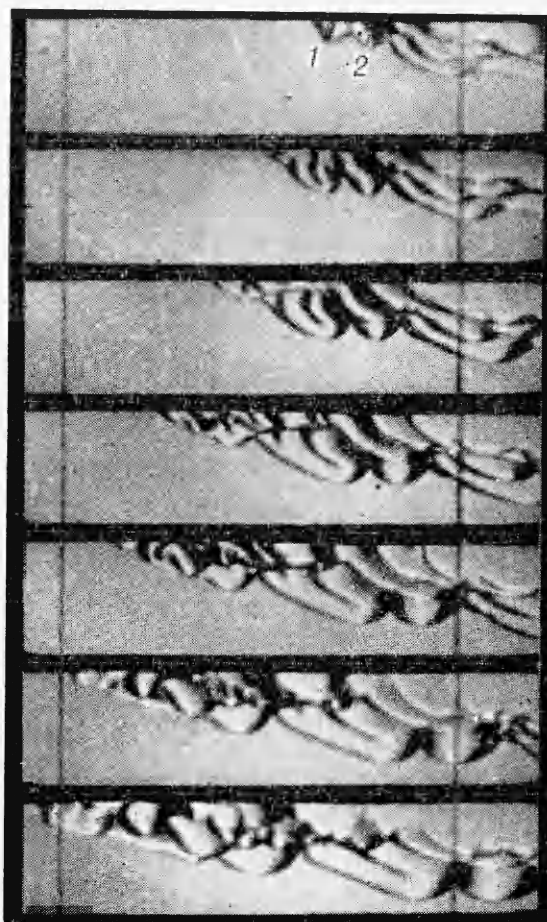


Рис. 2. Распространение пламени в стехиометрической смеси при разности потенциалов 30 кВ.

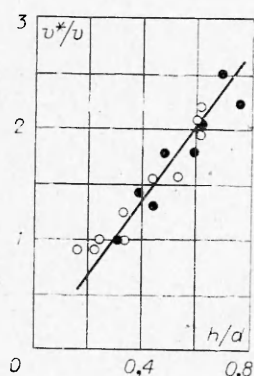


Рис. 3. Зависимость  $v^*/v$  от  $h/d$ .

спространения пламени  $v$ , показал, что чем быстрее «расплывается» возмущение, тем медленнее растет его скорость.

Скорость перемещения возмущения пропорциональна скорости распространения фронта пламени и величине  $h/d$  (рис. 3)

$$v^* = 3,4 \cdot v \cdot h/d, \quad (1)$$

где  $d$  — высота трубы, в которой сгорает смесь. На график нанесены экспериментальные данные, полученные для различных сухих (светлые точки) и влажных (темные точки) метано-воздушных смесей. Содержание метана в смеси варьировалось от 7 до 12,3%, влажность — от 0 до 1,7%, разность потенциалов — от 12 до 30 кВ.

Рассматривая пламя, распространяющееся в электрическом поле, как поверхность раздела двух сред разной плотности в поле с эффективным ускорением силы тяжести, можно провести аналогию между волнами на поверхности пламени и гравитационными волнами на границе раздела двух жидкостей разной плотности [5]. В теории гравитационных волн [7] рассматривается два предельных случая. Согласно теории «глубокой воды», фазовая скорость волн  $C$  связана с их длиной  $\lambda$  соотношением

$$C = \sqrt{g\lambda(\rho_1 - \rho_2)/2\pi(\rho_1 + \rho_2)}, \quad (2)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности;  $g$  — ускорение силы тяжести. Для так называемой «мелкой воды» скорость волн не обладает дисперсией и связана с глубиной жидкости  $h$  соотношением

$$C = \sqrt{gh}. \quad (3)$$

Поскольку скорость перемещения волн по поверхности пламени не зависит от  $\lambda$ , для оценки  $g_{эфф}$  воспользуемся выражением (3). Величина  $h$  в данном случае изменяется от 0 до 3,6 см (высота трубы). Скорость волн в зависимости от разности потенциалов, состава и влажности горючей смеси лежит в интервале 3—14 м/с. Приняв  $h = 3,6$  см, скорость волн — 9 м/с, получим  $g_{эфф} \approx 220 g$ , т. е. на пламя в электрическом поле действует сила, на два порядка превосходящая силу гравитационного поля в обычных условиях. Эта оценка находится в соответствии с оценкой, проведенной в [4].

Хотя между волнами, возникающими на поверхности пламени в электрическом поле, и гравитационными волнами на границе раздела двух сред есть аналогия, ни один из предельных случаев теории гравитационных волн нельзя использовать для количественного описания процесса волнообразования на поверхности пламени.

### Скорость распространения пламени в электрическом поле

Растяжение пламени в электрическом поле и появление волн на его поверхности увеличивают общую поверхность пламени и, как следствие, скорость его распространения.

Анализ экспериментальных данных показал, что в отсутствии электрического поля скорость распространения пламени мало зависит от влажности горючей смеси. Значения скоростей распространения пламен в сухих смесях и смесях, содержащих около 2% паров воды, отличаются не более чем на 15%. При наложении электрического поля



картина меняется. Чем больше влаги в смеси, тем при прочих равных условиях меньше интенсифицирующее влияние поля (рис. 4). Обращает на себя внимание своеобразный ход кривой, характеризующий эту зависимость. Наибольшее влияние оказывает поле на пламя, распространяющееся в сухой смеси. Скорость его возрастает в 8 раз. Увеличение содержания паров воды до 0,9% практически не сказывается на скорости распространения пламени. Второй участок кривой характеризуется более чем трехкратным уменьшением скорости распространения пламени при увеличении влажности от 0,9 до 1,8%. Дальнейший рост содержания влаги до 2,4% очень мало изменяет скорость распространения пламени.

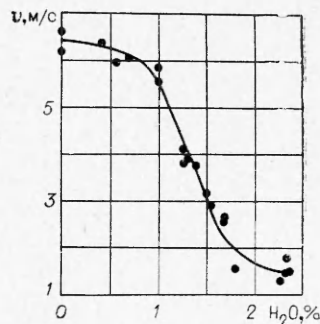


Рис. 4. Зависимость скорости распространения пламени стехиометрической смеси от ее влажности при разности потенциалов 30 кВ.

При уменьшении разности потенциалов кривая деформируется: сокращается первый участок кривой и появляется новый, на котором при достаточно большой влажности скорость распространения пламени не отличается от скорости пламени в отсутствии поля. В частности, в смеси, содержащей 1,8% паров воды, влияние поля становится заметным только при разности потенциалов  $U > 24$  кВ.

Чтобы во влажной смеси получить то же относительное увеличение скорости пламени, что и в сухой смеси, следует приложить большую разность потенциалов. Так, если для пятикратного увеличения скорости пламени в сухой смеси достаточна разность потенциалов 14 кВ, для достижения того же эффекта в смеси, содержащей 1,3% паров воды, необходимо  $U = 30$  кВ.

Меньшее интенсифицирующее влияние электрического поля на сгорание влажных смесей обусловлено сравнительно небольшим растяжением пламени влажных смесей в электрическом поле и слабо идущим на их поверхности процессом волнообразования (см. рис. 1).

Серия опытов, проведенных с сухими метано-воздушными смесями различного состава, показала, что интенсифицирующее влияние поля зависит от содержания горючего в смеси. Три кривые, представленные на рис. 5, характеризуют относительное увеличение скоростей распространения пламен при разных  $U$ .

Выше было показано, что с уменьшением содержания горючего в смеси изменяется растяжение пламени и количество возмущений на его поверхности. Чем беднее смесь, тем меньше величина относительного максимального растяжения пламени в электрическом поле. Процесс волнообразования, наоборот, идет значительно интенсивнее в бедных смесях. Этот же вывод можно получить, оценивая темп роста поверхности пламен различных смесей по темпу роста скоростей их распространения.

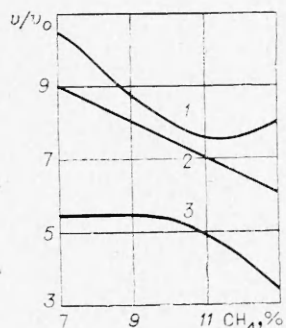


Рис. 5. Относительное увеличение скорости распространения пламени в электрическом поле при  $U$ , равном 30 (1), 27 (2) и 16 кВ (3).

Действительно, при  $U > 16$  кВ вытянутости пламен всех сухих метано-воздушных смесей достигают своих предельных значений. Увеличение скорости распространения пламени в этом случае в предположении, что величина нормальной скорости пламени не изменяется в электрическом поле, можно связать с ростом поверхности пламени за счет волнообразования. Приняв величину поверхности пламени при  $U = 16$  кВ

за единицу, легко оценить темп ее роста при более высокой разности потенциалов.

Оценка показала, что в бедных смесях он наибольший. По мере увеличения разности потенциалов различие в темпах роста поверхностных пламен бедных и богатых смесей возрастает. Итак, интенсивное волнообразование при сравнительно низких разностях потенциалов и достаточно высокий его темп, когда растяжение фронта пламени прекращается, обуславливают более сильное увеличение скорости распространения пламен бедных смесей в электрическом поле.

Заканчивая рассмотрение вопроса о скоростях распространения пламени в электрическом поле, отметим, что описанные выше экспериментальные данные качественно могут быть объяснены с гидродинамической точки зрения, и попытаемся оценить хотя бы порядок величины эффективного ускорения  $g_{эфф}$ , действующего на газ в электрическом поле.

Известно, что скорость равномерного распространения пламени в горизонтальной трубе в отсутствие электрического поля связана с горизонтальной составляющей скорости свежей смеси в передней точке фронта пламени  $w_x$  и нормальной скоростью  $u_n$  пламени соотношением  $v_0 = w_x - u_n$ .

Из экспериментальных данных следует, что величина  $v_0/u_n$  является линейной функцией выражения  $\sqrt{\frac{gd(\rho_1 - \rho_2)}{u_n^2 \rho_1}}$ , пропорционального скорости, приобретаемой холодной смесью плотностью  $\rho_1$  при свободном падении в поле тяжести из верхней части трубы в нижнюю (здесь  $\rho_2$  — плотность продуктов реакции).

Построив аналогичную зависимость для случая распространения пламени в электрическом поле, можно, сравнив угловые коэффициенты прямых, оценить величину  $g_{эфф}$ . Она оказывается на два порядка больше  $g$ . Поскольку при тех же разностях потенциалов скорости распространения пламен влажных смесей значительно меньше, величина  $g_{эфф}$  для них должна быть меньше, чем для сухих смесей. Меньшая объемная сила, действующая на влажную смесь в электрическом поле, возможно, связана с образованием в свежей смеси в присутствии паров воды, обладающих высокой диэлектрической постоянной, комплексов с низкой подвижностью. Последнее может привести к локализации заряженных частиц вблизи фронта пламени и уменьшению величины объемного заряда.

*Поступила в редакцию 23/XII 1976,  
после доработки — 18/II 1977*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Д. Саламандра. ФГВ, 1969, 5, 2.
2. Г. Д. Саламандра.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
3. Г. Д. Саламандра. Теплофизические свойства и газодинамика высокотемпературных сред. М., «Наука», 1972.
4. J. Lawton, F. J. Weinberg. Electrical aspects of combustion. Clarendon Press, Oxford, 1969.
5. Н. И. Кидин. Канд. дис. МФТИ, 1975.
6. Г. Д. Саламандра, Н. М. Вентцель, И. К. Федосеева. ФГВ, 1976, 12, 2.
7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., ГИТТЛ, 1953.