

$\Omega = 0$ является бифуркационным для нелинейной системы (6): при $\Omega = 0$ существует только плоское установившееся решение; при $\Omega > 0$ — два типа решений: стационарный негладкий фронт пламени и плоский фронт горения. То или иное решение реализуется в зависимости от начальных условий.

Таким образом, можно утверждать, что выражение (5) или, эквивалентно, система уравнений (6) удовлетворительно описывают процесс формирования ячеистой структуры при взаимодействии гидродинамической неустойчивости плоского пламени с эффектом нормального распространения горения. Оправданием предложенного модельного уравнения (5) эволюции фронта пламени с учетом гидродинамической неустойчивости горения служат следующие результаты: 1) согласованность модели с уравнением Зельдовича для скорости убывания амплитуды возмущения плоского пламени, 2) возможность уточнения констант амплитудного уравнения благодаря учету при его выводе дополнительных квадратичных слагаемых, 3) построение формул типа условий Репкина — Гюгонио для скорости движения линий излома вдоль фронта пламени; указывающих на значительное увеличение скорости схлопывания мелко-масштабных ячеек с ростом коэффициента теплового расширения продуктов сгорания.

Поступила в редакцию 2/IV 1984

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. D. M. Michelson, G. I. Sivashinsky. Acta Astronautica, 1977, 4, 1207.
2. G. I. Sivashinsky. Acta Astronautica, 1977, 4, 1177.
3. Б. Е. Рогоза. ФГВ, 1983, 19, 2.
4. Б. Е. Рогоза. ФГВ, 1983, 19, 3.
5. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1966, 1.
6. Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
7. В. Р. Кузнецов. ФГВ, 1975, 11, 4.
8. Б. Е. Рогоза. ФГВ, 1982, 18, 3.
9. Е. Е. Мешков, В. Н. Мохов. ФГВ, 1982, 18, 3.
10. М. И. Рабинович, А. Л. Фабрикант. Изв. вузов. Радиофизика, 1976, 19, 5—6.

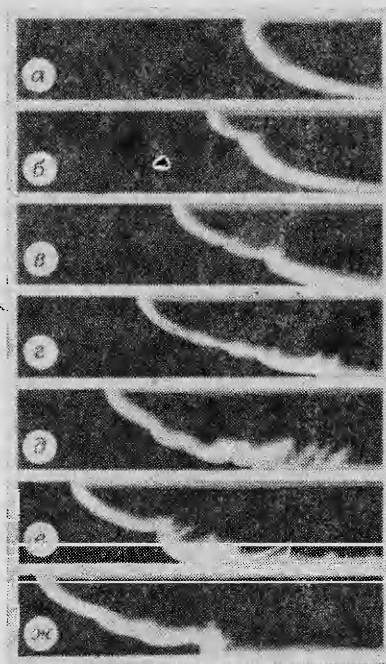
О МЕХАНИЗМЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДОПРОБОЙНОГО ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ТРУБАХ С НЕИЗОЛИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Н. И. Майоров

(Москва)

Изучение влияния электрического поля на пламена интересно в связи с проблемой создания эффективных физических способов управления процессами горения [1, 2]. К настоящему времени установлен ряд закономерностей, характеризующих возникновение и развитие возмущений на поверхности пламени, связь скорости его распространения с разностью потенциалов на электродах, составом смеси, ее влажностью и т. п. [3, 4]. Эти закономерности, полученные при распространении пламени в трубах с изолированными электродами, подтверждают электрогидродинамический характер воздействия постоянного электрического поля на зону горения. Что касается влияния электрического поля на распространение пламени в трубах с неизолированными электродами в условиях, обеспечивающих протекание по пламени электрического тока, то на первый взгляд создается впечатление, что при этом в основном реализуется тепловой механизм воздействия поля на пламя. К тому же обращает на себя внимание, что если в трубе с изолированными электродами [4]

Рис. 1. Деформация пламени в первые моменты после наложения на него электрического поля ($U = 30$ кВ). Отрицательный потенциал на верхнем электроде. Время между кадрами 10,3 мс.



удается достичь почти десятикратного увеличения скорости распространения пламени в электрическом поле, то в трубе с неизолированными электродами [5] в широком диапазоне изменения разности потенциалов скорость пламени возрастает не более чем в 1,5–2 раза.

Чтобы внести некоторую ясность в механизм влияния электрического поля на распространение пламени в трубах с неизолированными электродами и выяснить, чем при этом обусловлено такое небольшое увеличение скорости распространения, проведено экспериментальное исследование особенностей деформации пламени в зависимости от ориентации реакционной трубы и направления приложенного поля.

Опыты проводили в трубе квадратного сечения 36×36 мм, расположенной или горизонтально, или вертикально. В переднюю и заднюю стенки трубы были вмонтированы плоскопараллельные оптические стекла, позволяющие просматривать все ее сечение на длине 200 мм. Для создания поперечного электрического поля использовали электроды, установленные заподлицо со стенками реакционной трубы. На один из электродов подавали высокое напряжение отрицательной полярности, другой электрод заземляли. Максимальная разность потенциалов U на них составляла 30 кВ. В качестве горючей смеси использовали сухую метано-воздушную смесь, содержащую 10% CH_4 . Смесь поджигали у открытого конца трубы, реализуя режим равномерного распространения пламени. В вертикальной трубе поджиг осуществляли сверху. Процесс распространения пламени визуализировали методом Тёплера и регистрировали скоростной камерой СКС-1. Для измерения тока, текущего между электродами, использовали светолучевой осциллограф Н-700.

Серия теплерограмм, представленная на рис. 1, иллюстрирует начальную стадию деформации пламени, распространяющегося в горизонтальной трубе, после наложения на зону горения электрического поля. На рис. 1, а зарегистрирован фронт пламени в отсутствие электрического поля, а на рис. 1, в — ж — деформирующийся под его влиянием фронт. Анализ кинематографического материала показал, что при распространении пламени в трубе с неизолированными электродами так же, как и в случае изолированных электродов [3], на его поверхности вблизи отрицательно заряженного электрода возникают возмущения и перемещаются к положительно заряженному электроду. Амплитуда возмущений и длина их волны λ — расстояние между соседними углублениями на поверхности пламени — при этом растут, причем величина λ , как и при распространении пламени в трубе с изолированными электродами [6], увеличивается по экспоненциальному закону: $\lambda = ae^{bt} + c$, где a , b и c — постоянные, различные для разных возмущений. В частности, для первого возмущения, возникшего после наложения на зону горения электрического поля, они составляют соответственно 4,22; 0,152 и —4,73.

Скорость v^* перемещения возмущений, как и в [4], прямо пропорциональна скорости распространения пламени v и расстоянию h^* от верхней стенки трубы до границы контура пламени в месте нахождения

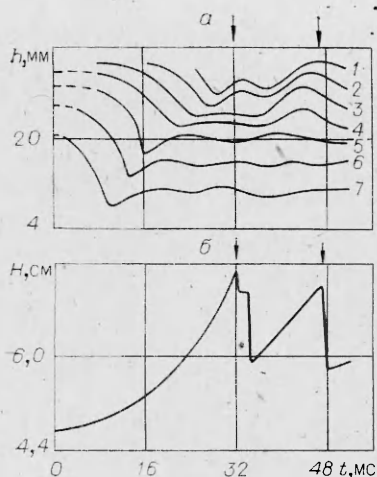


Рис. 2. Изменение во времени ($U = 30$ кВ) координат контура (а) и вытянутости (б) пламени. x_i , мм: 1 — 56,0, 2 — 51,0, 3 — 42,5, 4 — 34,0, 5 — 25,5, 6 — 17,0, 7 — 8,5.

возмущений: $v^* = 3,4vh^*/d$, где d — высота трубы, в которой сгорает смесь.

Характерно, что, хотя фронт пламени полностью находится в электрическом поле после его наложения на зону горения, перемещение возмущений по поверхности пламени сопровождается деформацией лишь возмущенных участков фронта, в то время как невозмущенная его часть распространяется аналогично фронту в отсутствие поля. Это свидетельствует о том, что формирование структуры фронта по-

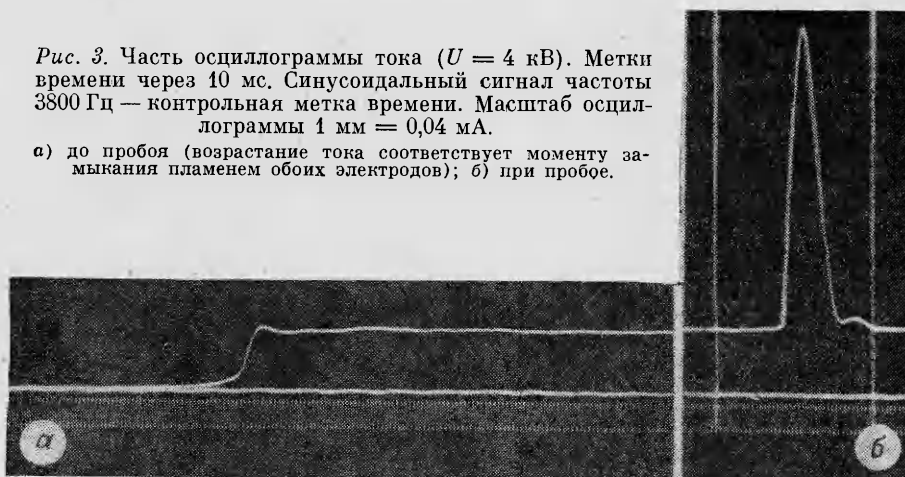
сле наложения на него электрического поля происходит лишь через определенное время (~ 40 мс). Перемещение возмущений по поверхности пламени сопровождается и изменением скоростей распространения деформированных его участков. В то время как скорость головных участков фронта растет, скорости участков, лежащих вблизи нижней стенки трубы, уменьшаются, а затем меняют свое направление на обратное. Это приводит к увеличению вытянутости пламени H — расстояния между передней и задней точками фронта в направлении оси трубы. Характер изменения формы фронта пламени после наложения на зону горения электрического поля и скоростей распространения деформированных участков фронта на различных расстояниях от стенок трубы, которые качественно протекают так же, как и в трубе с изолированными электродами, свидетельствует об электрогидродинамической природе воздействия поля на распространение пламени.

Отличительная особенность распространения пламени в трубе с неизолированными электродами — периодические пробои между возмущениями вблизи заднего участка фронта и положительным электродом. Анализ теплереограмм показал, что промежуток времени τ между двумя последующими пробоями $\tau \approx 0,1\alpha d/v$, где $\alpha = \rho_1/\rho_2$ — степень теплового расширения газа в пламени; ρ_1 и ρ_2 — плотности свежей смеси и продуктов реакции соответственно. Момент, близкий к одному из пробоев, зарегистрирован на рис. 1, д. Легко заметить, что пробой приводит к сокращению вытянутости фронта, которая после пробоя снова возрастает (см. рис. 1, е, ж).

Изменения координаты h контура пламени на фиксированных расстояниях x_i от передней его точки и вытянутости фронта после наложения на него электрического поля приведены на рис. 2. Отсчет ведется от момента наложения поля. Стрелками отмечены моменты первых двух пробоев. Части кривых, где изменения величины h сопоставимы с погрешностью измерения, проведены штриховой линией. Линии 1—5 позволяют проследить за изменением во времени h_i практически на всей длине недеформированного фронта пламени, кривые 6, 7 характеризуют деформацию уже растянутого фронта. Видно, что при перемещении возмущения по поверхности пламени величины h_i во всех точках контура уменьшаются, достигая последовательно экстремальных значений h_i^{\min} . Обращает на себя внимание, что в отличие от случая изолированных электродов [3] при распространении пламени в трубе с неизолированными электродами амплитуда колебаний участков фронта, характеризуемая отношением координаты контура h_i^0 недеформированного фронта пламени к h_i^{\min} деформированного фронта, уменьшается по мере удаления от головной части (см. рис. 2, а), обуславливая меньший темп роста вытянутости (см. рис. 2, б). Более того, увеличение H при этом прерывается

Рис. 3. Часть осциллограммы тока ($U = 4$ кВ). Метки времени через 10 мс. Синусоидальный сигнал частоты 3800 Гц — контрольная метка времени. Масштаб осциллограммы 1 мм = 0,04 мА.

а) до пробоя (возрастание тока соответствует моменту замыкания пламенем обоих электродов); б) при пробое.



периодическими пробоями между возмущениями вблизи заднего участка фронта и положительным электродом. В области, прилегающей к месту пробоя, амплитуда колебаний участков фронта увеличивается (кривые 1—4), что способствует росту площади поверхности пламени. Однако значительное сокращение H в момент пробоя, вероятно, компенсирует ее рост, поскольку скорость распространения деформирующегося фронта, определенная по ведущей точке, остается неизменной.

По теплерограммам, к сожалению, невозможно определить значения локальных участков S , с которых происходят пробой к положительному электроду. Для оценки по порядку величины плотности тока, текущего через участки фронта вблизи мест пробоя, за значение S , как показал анализ фотографического материала, можно принять величину порядка квадратных миллиметров. Тогда при токах порядка миллиампер (при пробое ток возрастает в несколько раз (рис. 3)) получим плотность тока в несколько десятых ампер на квадратный сантиметр. При таких плотностях тока количество тепла, выделяющегося за счет протекания в единице объема участков фронта вблизи мест пробоя за единицу времени, того же порядка, как и тепловыделение за счет химической реакции. Джоулева диссипация энергии в участки фронта около мест пробоя приводит к увеличению скоростей распространения этих участков. Однако перемещение возмущений по поверхности пламени к положительно заряженному электроду затормаживает этот эффект. Таким образом, в случае распространения пламени в трубе с неизолированными электродами электрогидродинамическое воздействие поля вызывает растяжение фронта пламени, а периодические пробой и обусловленное этим тепловое воздействие вблизи них — сокращение фронта.

Электрогидродинамический характер воздействия поля на распространение пламени в трубе с неизолированными электродами подтверждается также особенностями деформации пламени при переполюсовке электродов и вертикальном расположении трубы.

Серия теплерограмм, приведенная на рис. 4, характеризует процесс «переворачивания» фронта пламени от верхней стенки трубы к нижней. Рис. 4, а соответствует фронту, распространяющемуся с $v = 0,9$ м/с в отсутствие электрического поля, а рис. 4, б — з характеризует его перестройку после наложения отрицательного потенциала на нижний электрод. Видно, что при изменении полярности нижнего электрода с положительной (см. рис. 1) на отрицательную (см. рис. 4) передняя точка фронта пламени переходит к нижней стенке. Возмущения также перемещаются по его поверхности от отрицательного электрода к положительному. Скорость распространения пламени, определенная по его передней точке, в стадии установившегося режима (распространения пламени с

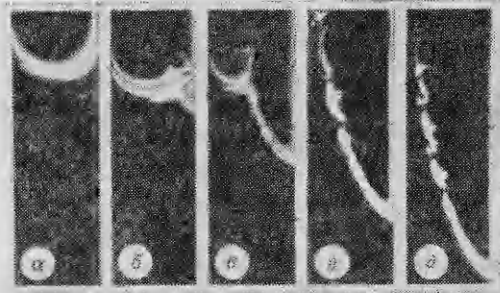
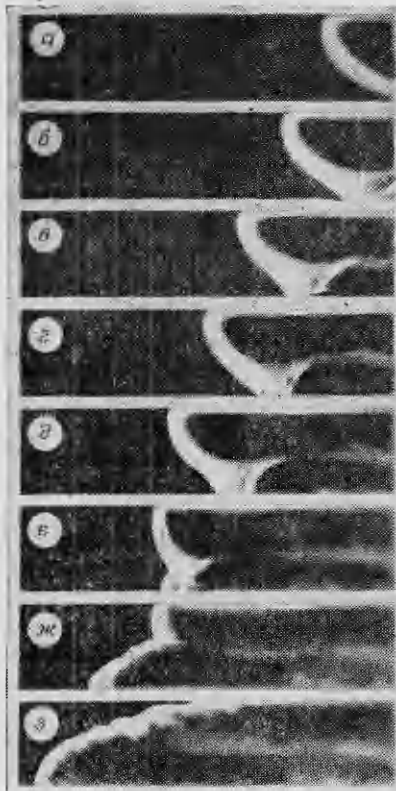


Рис. 5. Распространение пламени в вертикальной трубе ($U = 4$ кВ). Отрицательный потенциал на правом электроде. Время между кадрами 16 мс.

Рис. 4. Распространение пламени в горизонтальной трубе ($U = 4$ кВ). Время между кадрами 20 мс.

постоянной скоростью) в обоих вариантах наложения поля (при прочих равных условиях) одинакова и составляет $\sim 1,5$ м/с.

Фронт пламени, распространяющийся в вертикальной трубе с v в 1,4 раза меньшей, чем в горизонтальной, и имеющий почти симметричную относительно оси трубы форму в отсутствие электрического поля (рис. 5, а),

при его наложении постепенно вытягивается вдоль отрицательно заряженного электрода (рис. 5, б — д). Перемещение возмущений по поверхности пламени происходит аналогично перемещению в горизонтальной трубе. Скорость распространения в стадии установившегося режима при той же разности потенциалов близка к скорости распространения в горизонтальной трубе.

Таким образом, характер деформации пламени в горизонтальной трубе при различных направлениях приложенного электрического поля и в вертикальной свидетельствует о том, что основную роль в данном случае играет электрогидродинамическое воздействие. Тепловое воздействие поля при этом мало. Как показывают оценки, проведенные по замеренным значениям электрического тока ($\sim 0,33$ мА) и характеристикам самого фронта (длина контура пламени ~ 80 мм; тепловая ширина фронта $\kappa/u_n = 0,006$ мм), тепловое воздействие по крайней мере на 2 порядка меньше тепловыделения за счет химической реакции.

Рассматривая пламя, распространяющееся в электрическом поле, как поверхность раздела двух сред разной плотности в поле с эффективным ускорением $g_{эф}$ силы тяжести [7] и используя экспериментальные данные по скорости перемещения возмущений по поверхности пламени и по скорости распространения пламени аналогично [4], можно оценить $g_{эф}$. Оценки показывают, что $g_{эф}$ при этом достигает величины порядка десятков g .

Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы.

1. Экспериментально подтвержден электрогидродинамический механизм воздействия поля на распространение пламени в трубе с изолированными электродами.

2. Показано, что увеличение скорости распространения пламени в электрическом поле в случае неизолированных электродов лимитируется сравнительно меньшим, чем в трубе с изолированными электродами, увеличением площади его поверхности, обусловленным как небольшим

количеством возмущений на поверхности пламени, так и периодическими пробоями между пламенем и электродом, ограничивающими его вытянутость.

Поступила в редакцию 29/III 1984,
после доработки — 16/I 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. М. Степанов, Б. Г. Дьячков. Ионизация в пламени и электрическое поле. М.: Металлургия, 1968.
2. Дж. Лаутон, Ф. Вайнберг. Электрические аспекты горения. М.: Энергия, 1976.
3. G. D. Salamandra, I. K. Fedoseyeva, N. I. Mayorov et al. — In: Proceedings of the International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Tokyo, 1978.
4. Г. Д. Саламандра, Н. И. Майоров. ФГВ, 1978, 14, 3, 90.
5. Г. Д. Саламандра. — В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
6. И. И. Майоров. Канд. дис., ЭНИИ, 1984.
7. И. И. Кидиян. Канд. дис., МФТИ, 1975.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ СИСТЕМЫ ЦИРКОНИЙ — УГЛЕРОД — ВОДОРОД

Н. А. Мартиросян, С. К. Долуханян, А. Г. Мержанов
(Ереван, Черноголовка)

В настоящее время одним из направлений развития метода СВС является синтез многокомпонентных соединений, вследствие чего важное значение приобретает изучение механизма взаимодействия реагентов в сложных системах, которое представляет и самостоятельный интерес для развития теории горения. При исследовании одной из таких систем ($\text{Me} - \text{C} - \text{H}_2$) обнаружены неизвестные ранее эффекты, связанные с различием механизма и закономерностей горения бинарных составляющих.

В [1, 2] на примере системы титан — углерод — водород показана возможность протекания горения по двум взаимоисключающим направлениям: с реализацией высоко- либо низкотемпературного режима. Характерная особенность этой системы — наличие критических гистерезисных переходов между режимами и связанная с этим неединственность стационарных режимов горения.

Настоящая работа посвящена изучению закономерностей и механизма горения в системе $\text{Zr} - \text{C} - \text{H}_2$ с целью выяснения распространенности обнаруженных ранее эффектов. Эксперименты проводили по известной методике [3] в бомбе постоянного давления с порошком циркония марки М-41, ламповой сажей и газообразным водородом. Химический анализ проводили на содержание общего и свободного углерода, циркония и водорода, рентгеновский анализ — на установке ДРОН-0,5. Температуры и скорости горения измеряли термометрическим методом [4, 5]. В опытах изменялся состав исходной смеси от $\text{Zr} + 0,1\text{C}$ до $\text{Zr} + 1,0\text{C}$, давление водорода составляло 0,5—100 атм. Состав поджигали горячей таблеткой из смеси $\text{Ti} + 2\text{B}$.

При исследовании фазового и химического состава продуктов горения обнаружено, что в данном случае, как и при горении системы $\text{Ti} - \text{C} - \text{H}_2$, возможно образование в результате СВС либо карбогидридов, либо гидридов циркония. В табл. 1 приведены данные химического и фазового анализов продуктов горения различных смесей при $p_{\text{H}_2} = 1$ атм. Видно, что при горении составов $\text{Zr} + 0,1 \div 0,5\text{C}$ продуктами горения являются гидриды циркония. Продукты горения составов $\text{Zr} + 0,6 \div 0,8\text{C}$ — смесь кубического ($\text{ZrC}_x\text{H}_{1-x}$) и гексагонального (ZrC_xH_y) карбогидридов циркония, причем доля последнего уменьшается с повышением содержания углерода в шихте вплоть до исчезновения (состав