

## К УСТОЙЧИВОСТИ ЛАМИНАРНОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В ТРУБЕ

Г. Д. Саламандра, Н. И. Майоров  
(Москва)

Задача о гидродинамической неустойчивости плоского фронта пламени решена в [1], где показано, что пламя абсолютно неустойчиво. Все возмущения на поверхности пламени растут по экспоненциальному закону, причем коротковолновые возмущения быстрее, чем длинноволновые.

Поскольку в экспериментах практически невозможно создать условия, аналогичные принятым при теоретическом рассмотрении, экспериментально проверить выводы теории оказалось трудно. Предсказанная Ландау гидродинамическая неустойчивость фронта пламени обнаружена в опытах со сферическими пламенами, распространяющимися от источника зажигания, расположенного в центре сосуда. Автотурбулизация пламени, как показали опыты, возникала только при достаточно больших числах Рейнольдса [2—6].

Многочисленные опыты по сжиганию горючих смесей в трубах свидетельствуют об устойчивости искривленного ламинарного фронта пламени. Высказано предположение, что сохранение пламенем устойчивой формы обусловлено существованием вблизи него движения газа, сносящего возникающие на поверхности пламени возмущения к стенкам трубы, где они гибнут, не успев достаточно развиться [7, 8]. Такое движение газа в непосредственной близости к фронту пламени, распространяющемуся с постоянной скоростью вблизи открытого конца горизонтальной трубы, обнаружено в работе [9].

Очевидно, что, создав каким-либо неконтактным способом возмущения на небольшой части поверхности пламени, можно с помощью кинематографических методов проследить за изменением формы фронта пламени под их воздействием. Трудности, связанные с ограниченностью времени, в течение которого могут развиваться эти возмущения, не столь велики, как это может показаться на первый взгляд. Данная работа посвящена исследованию деформации пламени, распространяющегося в полузамкнутой горизонтальной трубе, под воздействием возмущений, искусственно созданных на его поверхности кратковременным воздействием на зону горения поперечного электрического поля.

Опыты проводили в трубе квадратного сечения  $36 \times 36$  мм, в переднюю и заднюю стенки которой вмонтированы плоскопараллельные пластины из оптического стекла, позволяющие просматривать все сечение трубы на длине 200 мм, а в верхнюю и нижнюю стенки — электроды, служащие для наложения на зону горения электрического поля. На верхний электрод в течение регулируемого промежутка времени подавали высокое напряжение отрицательной полярности, нижний электрод заземляли. Разность потенциалов на электродах составляла 20 кВ.

В качестве горючей смеси использовали сухую метано-воздушную смесь, содержащую 10%  $\text{C}_2\text{H}_4$ , вытянутость фронта пламени которой сравнительно невелика. Это позволило на длине просматриваемого участка проследить за выходом пламени на режим равномерного распространения, его деформацией при наложении поля и развитием возмущений на поверхности пламени после снятия напряжения и заземления электрода. Исследуемый процесс визуализировали методом Теплера и регистрировали скоростной съемочной камерой СКС-1 с частотой съемки около 3600 кадр/с.

На рис. 1 приведены две серии теплерограмм, иллюстрирующих изменение формы фронта пламени под воздействием возмущений, обусловленных кратковременным воздействием на зону горения электрического поля. На первых кадрах зарегистрирован фронт пламени в режиме рав-

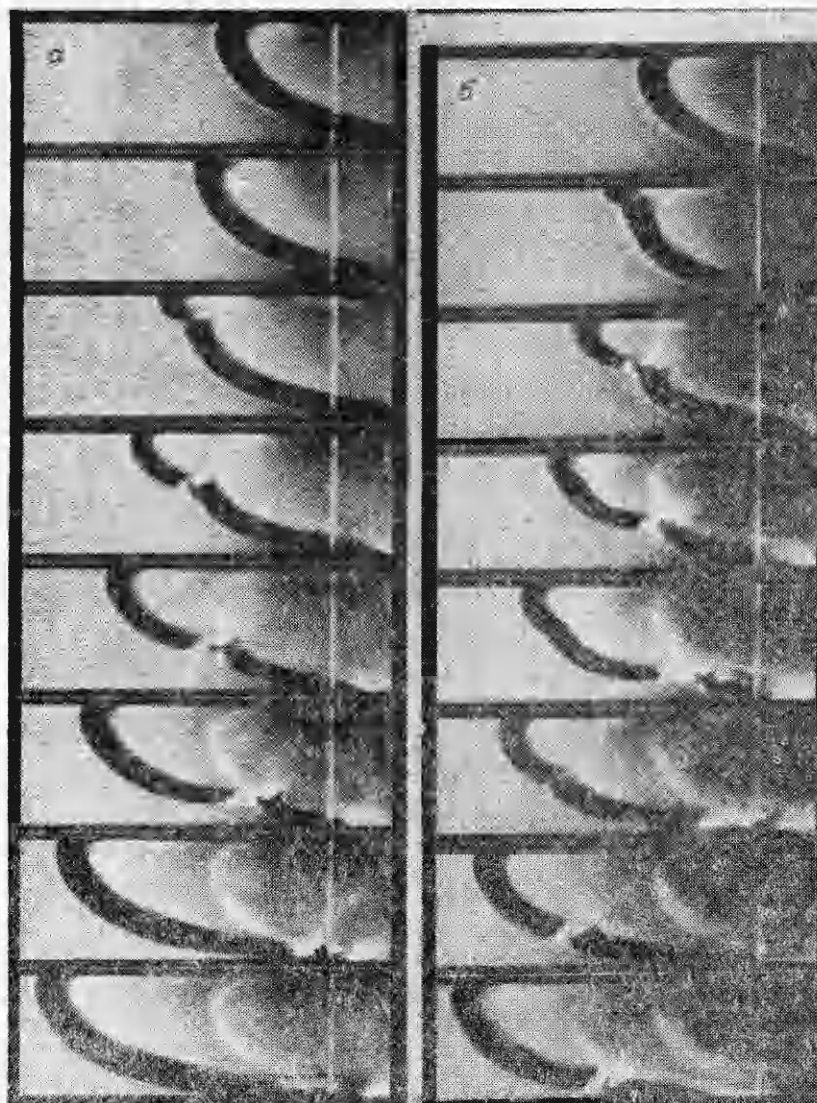


Рис. 1. Распространение возмущений на поверхности пламени. Время воздействия поля 3,7 (а) и 7,8 мс (б); кадры следуют через 7,5 мс.

померного распространения, на вторых — в момент снятия напряжения и заземления электрода. Легко заметить, что при кратковременном воздействии на зону горения электрического поля на поверхности пламени вблизи верхней стенки трубы возникает возмущение, величина которого тем больше, чем больше время воздействия поля. После снятия напряжения амплитуда возмущения и длина его «волны» растут. При большем времени воздействия поля на фронт пламени (см. рис. 1, б) количество возмущений, развивающихся на его поверхности, возрастает. Наряду с более крупными возмущениями регистрируются и мелкомасштабные, хорошо заметные на рис. 1. С течением времени они подавляются. Расплывание развивающихся возмущений на поверхности пламени способствует увеличению его вытянутости (расстояние между передней и задней точками фронта в направлении оси трубы). Дойдя до нижней стенки трубы, возмущения исчезают. Форма пламени начинает восстанавливаться.

Кривые, представленные на рис. 2, иллюстрируют характер расплывания возмущений на поверхности пламени с течением времени. Отсчет

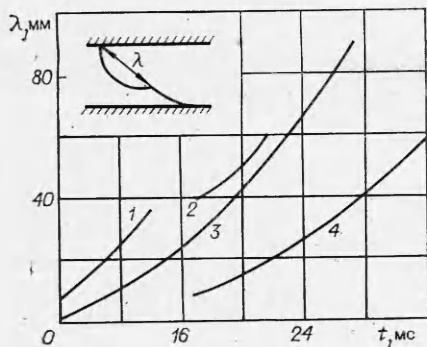


Рис. 2. Изменение величины  $\lambda$  во времени.

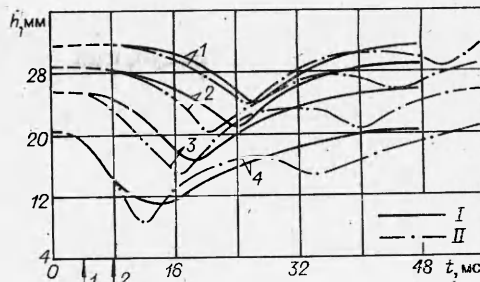


Рис. 3. Изменение величины  $h$  во времени для теплогрaмм рис. 1, а (I) и рис. 1, б (II) (цифры у стрелок: 1 — рис. 1, а, 2 — рис. 1, б).

$x$ , мм: 1 — 34, 2 — 25,5, 3 — 17,4, 4 — 8,5.

ведется от момента отключения поля. Кривая 3 характеризует изменение длины «волны» возмущения  $\lambda$ , зарегистрированного в серии теплогрaмм, приведенных на рис. 1, а, кривые 1, 2, 4 — величин  $\lambda$ , зарегистрированных на рис. 1, б. Кривая 1 соответствует развитию возмущения, зафиксированного на втором кадре. Анализ кривых показал, что во всех случаях величина  $\lambda$  возрастает по экспоненциальному закону:  $\lambda = ae^{bt} + c$  (где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — постоянные, различные для разных возмущений).

За восстановлением контура пламени удобно следить по изменению во времени координаты контура  $h$ , находящейся на расстоянии  $x$  от точки фронта, лежащей на верхней стенке трубы.

Изменение величины  $h$  для четырех точек фронта пламени вблизи головной его части показано на рис. 3. Отсчет ведется от момента наложения поля. Момент выключения поля отмечен стрелкой. Части кривых, где изменения  $h$  сопоставимы с погрешностью измерения, проведены штриховой линией. Видно, что после снятия напряжения величины  $h_i$  для всех  $x_i$  уменьшаются, достигая последовательно экстремальных значений  $h_i^{\min}$ . Величины относительного изменения  $h_i^0/h_i^{\min}$  ( $h_i^0$  — координата недеформированного контура пламени) уменьшаются по мере возрастания  $x_i$  соответственно от 1,9 и 2,4 (кривые 4) до 1,3 и 1,4 (кривые 1). Чем больше начальное возмущение, тем больше и амплитуда колебаний участков фронта. Форма передней части фронта пламени восстанавливается тем быстрее, чем меньше величина искусственно созданного возмущения.

Изменение вытянутости  $H$  пламени со временем представлено на рис. 4. Отсчет ведется от момента наложения поля. Стрелками отмечены моменты его отклонения, индексы 1 и 2 относятся к соответствующим кривым. Видно, что после отключения поля вытянутость фронта пламени монотонно возрастает. Темп ее роста увеличивается по мере приближения к максимальному значению, составляющему соответственно 1,8 (кривая 2) и 2,0 (кривая 1) вытянутости невозмущенного фронта пламени. Большой темп роста кривой 1 связан с более интенсивным возмущением поверхности пламени.

Вытянутость пламени начинает уменьшаться после достижения первым возмущением нижней стенки трубы. Последующее возмущение несколько замедляет темп сокращения вытянутости пламени.

Приведенный выше экспериментальный материал позволяет сделать следующие выводы.

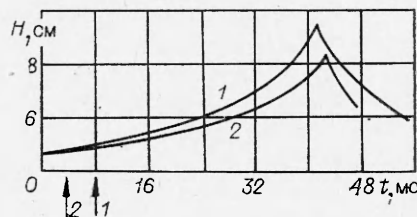


Рис. 4. Изменение величины  $H$  во времени для серии теплогрaмм рис. 1, а (2) и 1, б (1).

1. Обнаружено развитие искусственно созданных возмущений на поверхности пламени, распространяющегося в полузамкнутой горизонтальной трубе.

2. Показано, что величина  $\lambda$  возмущений растет по экспоненциальному закону; мелкомасштабные возмущения на поверхности пламени подавляются крупномасштабными возмущениями; устойчивая искривленная форма фронта пламени в трубе обусловлена стабилизирующим действием ее стенок, что находится в соответствии с выводами работ [7, 8].

Поступила в редакцию 13/VIII 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14, 6, 240.
2. Я. Б. Зельдович, А. И. Розловский. Докл. АН СССР, 1947, 57, 4, 240.
3. Х. А. Рахипова, Я. К. Трошин, К. И. Шелкин. ЖТФ, 1947, 17, 12, 1397.
4. Я. К. Трошин, К. И. Шелкин. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, 9, 160.
5. Н. А. Карашарлы, И. Г. Керимов и др. Докл. АН АзССР, 1955, 11, 12, 819.
6. Л. А. Гуссак, Е. Н. Спринцина, К. И. Шелкин. ФГВ, 1968, 4, 3, 358.
7. Я. Б. Зельдович. Структура и устойчивость стационарного ламинарного пламени при умеренно больших числах Рейнольдса. Препринт ИХФ АН СССР. Черноголовка, 1979.
8. Я. Б. Зельдович, А. Г. Истратов и др. Гидродинамика течения и устойчивость искривленного фронта при распространении пламени в каналах. Препринт ИПМ АН СССР. М., 1980.
9. Г. Д. Саламандра, Н. М. Вентцель, И. К. Федосеева. ФГВ, 1976, 12, 2, 229.

### К ВОПРОСУ ОБ УЧЕТЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО УГЛЕРОДА ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ СРЕДНЕЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ АЦЕТИЛЕНА

Г. Н. Крикунов, А. Ю. Поганов

(Воронеж)

Детонацию ацетилена отличает от детонации других горючих газов наличие в зоне реакции твердой фазы в виде дисперсного углерода, причем его содержание намного превышает содержание газообразных компонентов. Наряду с конденсированным углеродом  $C_k$  в продукты детонации ацетилена входят  $H_2$ ,  $H$ ,  $CH_4$ ,  $CH_2$ ,  $CH$ ,  $CH_3$ ,  $C_2H$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_{газ}$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  [1]. В [2] обнаружено, что применение обычных формул [3] для газовой детонации неприемлемо к газам, содержащим в продуктах детонации конденсированную фазу. В [1, 2] предложены новые методы расчета параметров детонационных волн в двухфазных системах, в которых при вычислении всех термодинамических характеристик, за исключением молекулярной массы, учитывается конденсированная фаза. В [1] приведены результаты расчетов параметров детонации ацетилена, сравнение которых с экспериментальными данными [4—6] показало, что расчетные величины превышают экспериментальные.

В настоящей работе предпринята попытка объяснить расхождение экспериментальных и расчетных данных заниженной в [1] средней молекулярной массой продуктов детонации ацетилена из-за неучета конденсированного углерода в ее определении. Между тем в [1] и в других подобных расчетах предполагается химическое, термодинамическое и механическое равновесие между конденсированной и газовой фазами в продуктах реакции.

Проведем анализ литературных данных о размерах сажевых частиц при горении углеродсодержащих смесей и при распаде ацетилена. В [7] показано, что при горении бензола размеры сажевых частиц уменьшаются соответственно с 1,4 нм при  $T = 1423$  К до 1,0 нм при  $T = 1773$  К. Размеры сажевых частиц при детонации ацетилена составляют 13—