

рованный предел, также уменьшается с начальным размером частиц. Результаты расчета аппроксимируются линейной зависимостью  $r_{20}w_0/\kappa_d = 3,91 \cdot r_{20}w_0/\kappa_d + 1,64$ . Относительная погрешность аппроксимации не превышает 5%. В рассмотренном случае холодные частицы не проходят стадию возгонки. Они не воспламеняются, так как температура поверхности не достигает температуры разложения.

Таким образом, найден концентрированный предел взвеси частиц унитарного топлива с учетом нелинейных и нестационарных эффектов в газе, которые существенны.

*Поступила в редакцию 3/III 1980*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Клячко, З. В. Истратова. III Всес. совещание по теории горения. Т. 11. Горение неоднородных систем и научные основы сжигания топлива. М., 1960.
2. П. Б. Вайнштейн, В. А. Пыж, В. П. Алешин. Исследование распространения воли горения в турбулентных потоках газозвеси. Отчет Института механики МГУ, № 1753, 1976.
3. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11.
4. А. Ф. Беляев, К. К. Андреев. Теория взрывчатых веществ. М., 1960.
5. Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский, В. Б. Либрович. Теория нестационарного горения пороха. М.: Наука, 1975.
6. Р. И. Нигматулин, И. Х. Рахматулина. ПМТФ, 1977, 4.
7. А. А. Самарский. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971.
8. Ю. А. Гостинцев. ФГВ, 1971, 8, 3.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ НЕОДНОРОДНЫХ СМЕСЕЙ ПЛОХООБТЕКАЕМЫМ ТЕЛОМ

*В. Л. Аполлонов, В. Н. Груздев, А. В. Талантов*

*(Казань)*

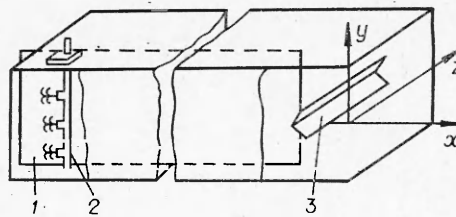
Стабилизация пламени неоднородных смесей — весьма сложное физическое явление. По сравнению с гомогенной смесью здесь вступают в действие дополнительные факторы, связанные с фазовой неоднородностью и распределением топлива в пространстве. Влиянием этих факторов, по-видимому, объясняется противоречивость литературных данных, отсутствие обобщающей теории и надежных методов расчета.

Ранее с целью восполнить отсутствие экспериментальных данных по влиянию балластирования и начальной температуры на срывные пределы исследована схема смесеобразования, используемая в реальной форсажной камере [1]. Полученные пределы стабилизации пламени не универсальны и зависят от расстояния между форсунками и стабилизатором, от характеристик форсунок, их расположения, размера канала и т. д. Говоря другими словами, они являются результатом совместного влияния неравномерности распределения топлива по сечению канала и двухфазности набегающей на стабилизатор смеси. С методической точки зрения желательно исследовать влияние каждого из этих факторов на стабилизацию пламени в отдельности. Для этого требуется организация специфических схем смесеобразования, которые исключали бы влияние на стабилизацию пламени одного фактора и в наиболее выпуклом виде отражали влияние другого.

Одна из таких схем исследована в [2], где за счет равномерного расположения форсунок по сечению трубы исключалось влияние неравномерности распределения топлива. В [2] показано, что при различном удалении форсунок от стабилизатора, т. е. при разной массовой доле паровой фазы топлива  $\varphi$  в набегающем потоке пределы стабилизации пламени обобщились коэффициентом избытка воздуха по массовой доле па-

Рис. 1. Схема экспериментального отсека.

1 — разделительная пластина; 2 — форсунка; 3 — стабилизатор.



ровой фазы в зоне циркуляции  $\alpha_n$ . Увеличение  $\phi$  в потоке приводило к постоянному сужению области устойчивого горения по «бедной» границе.

В настоящей работе исследовались механизм стабилизации пламени в условиях неравномерного распределения топлива в потоке перед стабилизатором и интенсивность выравнивания концентрации топлива в зоне циркуляции. В работе обсуждается вопрос, какие значения коэффициента избытка воздуха в зоне циркуляции (по паровому топливу)  $\alpha_n$  при наличии неравномерностей в зоне циркуляции ответственны за устойчивость горения — локальные или средние по зоне. При неоднородном распределении топлива в зоне циркуляции под средним коэффициентом избытка воздуха понимается средняя величина  $\langle \alpha \rangle$  по объему зоны.

При подготовке эксперимента необходимо добиться, чтобы набегающий поток имел существенную неравномерность в распределении горючей смеси. Кроме того, желательно исключить влияние двухфазности на механизм явления. Эти обстоятельства определили выбор схемы смешения. Канал размером  $120 \times 114$  мм перед желобковым стабилизатором пламени разделялся тонкой металлической пластиной на две неравные части (рис. 1). В узкую часть шириной 35 мм впрыскивался керосин ТС-1, по остальной части канала на стабилизатор набегал поток чистого воздуха. Температура воздуха в обоих каналах составляла 573 К. Нижний по потоку край разделительной пластины находился на расстоянии 10 мм до вершины стабилизатора, что практически исключало смешение потоков перед стабилизатором. Топливо вводилось против потока через три центробежные форсунки с диаметром сопла 0,8 мм. Форсунки располагались в середине сечения узкого канала с шагом 37 мм.

Расстояние от форсунок до стабилизатора  $L_\phi \approx 1000$  мм выбрано по результатам исследования влияния расстояния на срывную характеристику. При указанной величине  $L_\phi$  срывная характеристика практически совпадает со срывной характеристикой гомогенной смеси, т. е. исключалось влияние капель на стабилизацию пламени. Визуальное наблюдение показало, что после поджигания топливно-воздушной смеси пламя занимало за стабилизатором участок, равный примерно ширине узкого канала. Дальше в зоне циркуляции наблюдаются бледно-голубые всполохи затухающей интенсивности, которые указывают на диффузию горючей смеси вдоль стабилизатора.

Однако интенсивность этого процесса далеко не достаточна для полного выравнивания состава в зоне циркуляции, где сохраняется большая неравномерность распределения топлива (рис. 2). Отборы проб газа для анализа проводились вдоль стабилизатора на расстоянии, равном его высоте  $h = 40$  мм. Некоторая немонотонность в распределении состава смеси в узком канале, сохраняющаяся и в зоне циркуляции, связана с обогащением потока вблизи разделительной пластины и стенки канала из-за испарения попавшего на них жидкого топлива.

Анализ измеренных значений  $\alpha$  показывает, что в части зоны циркуляции, расположенной в потоке с топливом, коэффициент избытка воздуха при срыве минимален по зоне и равен таковому в случае использования гомогенной смеси при тех же условиях набегающего потока по давлению, температуре, скорости, турбулентности и т. д. Это соответствие соблюдалось на всех исследованных скоростях набегающего потока, а также на стабилизаторе меньших размеров ( $h = 20$  мм).

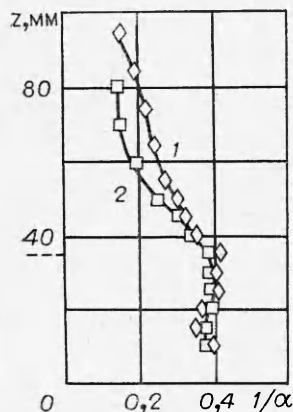


Рис. 2. Распределение концентрации топлива вдоль зоны циркуляции за стабилизатором пламени при ступенчатом распределении топлива в потоке.

1 —  $w=105$  м/с;  $\alpha_0=1,54$ ; 2 —  $w=93,5$  м/с;  $\alpha_0=1,58$ .

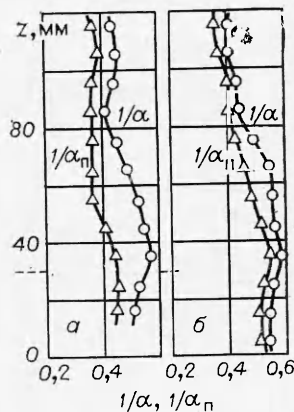


Рис. 3.3. Распределение концентрации топлива вдоль зоны циркуляции за стабилизатором пламени при гетерогенной подаче топлива.

○ — полный состав смеси,  $\Delta$  — состав по паровой фазе:  
а)  $\phi = 0,14$ м,  $w = 125$ м/с,  $\alpha_0 = 7,6$ ; б)  $L\phi = 0,3$ м,  $w = 120$  м/с,  $\alpha_0 = 4,7$ .

Горение в пределах зоны циркуляции на участке, на который набегает поток чистого воздуха (область бледно-голубых всполохов), поддерживается за счет диффузии активных центров, тепла и топлива от горячей области зоны циркуляции. Эти слабые диффузионные потоки обеспечивают горение составов смеси с  $\alpha = 3 \div 7$ , не реагирующих в условиях набегающего потока ( $T_0 = 573$  К), на расстоянии до 75 мм вдоль стабилизатора.

Вывод о наличии в зоне циркуляции области с определяющим устойчивостью горения значением  $\alpha_n$  применен при исследовании реальной схемы смесиобразования. Смесь создавалась впрыском керосина против потока через две центробежные форсунки, расположенные в плоскости симметрии желобкового стабилизатора ( $h = 40$  мм) на расстоянии 140 и 300 мм от его среза. Форсунки имели диаметр сопла 0,9 мм, расстояние между осями форсунок 60 мм. В связи с невысокими значениями массовой доли паровой фазы топлива перед стабилизатором, имевшими место в этих экспериментах, следовало выяснить, с помощью какого значения коэффициента избытка воздуха (по всему топливу или по его паровой части) могут обобщиться пределы стабилизации пламени неоднородных смесей.

Пробы смеси из зоны циркуляции отбирались специальным отборником и анализировались на предсрывных режимах в плоскости симметрии стабилизатора на расстоянии от его среза, равном примерно калибру желобка. В качестве примера на рис. 3 показано распределение величин  $1/\alpha$  по полному составу и по паровой фазе для  $T_0 = 573$  К. Разница в расходных характеристиках форсунок, как видно, привела к заметной неравномерности распределения состава в зоне циркуляции. Участок, определяющий срыв пламени, с наиболее «богатой» смесью (по  $\alpha$  и  $\alpha_n$ ) находится примерно против форсунки, положение которой отмечено штриховой линией на оси ординат.

Из рассмотрения распределения  $\alpha_n$  поперек зоны циркуляции в следе за форсункой (рис. 4) ясно, что в этом направлении имеются две области с наиболее «богатыми» смесями. Определяющей, очевидно, является та, которая находится на оси стабилизатора. Другая располагается в слое смешения с низкой температурой, где имеется довольно много испарившегося топлива, уносимого со стабилизатора.

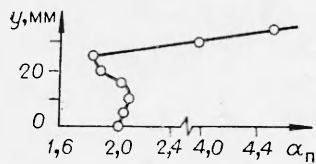


Рис. 4. Распределение коэффициента избытка воздуха по паровой фазе поперек зоны циркуляции за стабилизатором пламени;  $L_{\phi} = 0,14$  м,  $w = 140$  м/с,  $\alpha_0 = 8$ .

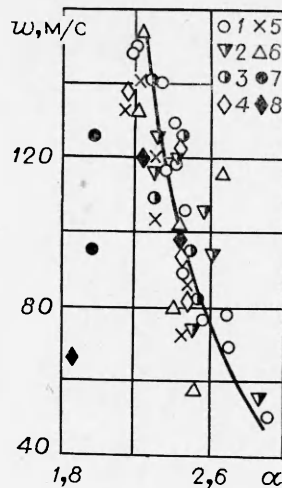


Рис. 5. «Бедная» граница срыва пламени, построения по  $\alpha_n$ .

Значения  $\alpha$  и  $\alpha_n$  на наиболее «богатом» участке зоны циркуляции при срыве горения определялись пересчетом в предположении пропорционального изменения  $\alpha$  или  $\alpha_n$  и коэффициента избытка воздуха по общему расходу топлива  $\alpha_0$  при переходе от режима предсрывного горения до режима погасания пламени. Эти значения  $\alpha$  и  $\alpha_n$  сопоставляются на рис. 5 со срывной характеристикой гомогенной смеси. Условия эксперимента приведены в таблице. С точки зрения механизма явления наиболее интересно сравнить положение точек, соответствующих полному составу смеси и составу по паровой фазе. При  $L_{\phi} = 300$  мм и  $w = 93 \div 97$  м/с (скорость в канале  $w_0 \approx 62$  м/с) различие между  $\alpha$  и  $\alpha_n$  в зоне циркуляции практически несущественно. Это объясняется тем, что при таком уровне скорости степень испарения керосина в потоке, как это известно из [2], имеет максимальное значение. Путем расчетов по эмпирическим формулам этой работы установлено, что в данном случае  $\varphi = 0,6$ . При этом в зоне циркуляции  $\varphi_{з.п} = 0,92 \div 1,0$ .

При возрастании скорости ( $w = 120$  м/с) расхождение между  $\alpha$  и  $\alpha_n$  несколько увеличивается, но остается в пределах точности эксперимента (см. рис. 5). Степень испарения топлива в потоке немного уменьшилась, однако за счет улучшения теплоотдачи от газа к жидкости, осевшей на стабилизаторе, ее значение в зоне циркуляции в итоге осталось на высоком уровне ( $\varphi_{з.п} = 0,86 \div 0,97$ , в определяющей области  $\varphi_{з.п} = 0,92$ ). При уменьшении скорости ( $w = 67$  м/с) падение степени испарения топлива в потоке ( $\varphi \approx 0,4$ ), а также менее интенсивное испарение керосина на стабилизаторе способствует попаданию в зону рециркуляции большего количества жидкого топлива, и полный состав в зоне существенно отличается от состава смеси на обобщающей кривой.

При приближении форсунок к стабилизатору, а следовательно, уменьшении степени испарения керосина в потоке ( $\varphi = 0,3 \div 0,41$ ) заметное расхождение между полным составом и составом по паровой фазе наблюдается на всей срывной характеристике.

Точное соответствие между пределом стабилизации пламени гомогенной смеси и значениями  $\alpha_n$  позволяет заключить, что охлаждающее воздействие капели топлива на продукты сгорания в определяющей области зоны циркуляции в исследованном диапазоне  $\varphi_{з.п} = 0,85 \div 1,0$  пренебрежимо мало.

Полученные в данной работе результаты позволяют предложить следующий механизм стабилизации пламени неоднородных смесей. При произвольном характере распределения состава смеси вдоль стабилизатора определяющую для стабилизации пламени роль играют области в зоне циркуляции с наиболее высокой температурой горения. В случае «бедного» срыва — это участки с наиболее «богатым» составом смеси, в слу-

Условия экспериментов	$L_{\phi}$ , м	Точки на рис. 5	
		паровое топливо	паровое и капельное топливо
Однородная гомогенная смесь	4	1	—
Ступенчатое распределение топлива	1	2	—
Гетерогенная смесь, 2 форсунок	0,14	3	7
	0,3	4	8
	0,35	5	—
Гетерогенная смесь, 9 форсунок, равномерно расположенных по сечению камеры	0,575	6	—

чае «богатого» срыва — с наиболее «бедным» составом. Эти участки зоны циркуляции можно рассматривать как гомогенный реактор и использовать полученные на его основе выражения [3, 4] для расчета пределов устойчивого горения по величине  $\alpha_n$ . Горение в остальном объеме зоны рециркуляции, где концентрация топлива находится вне концентрационных пределов воспламенения для условий набегающего потока, происходит за счет диффузии тепла и активных центров от высокотемпературных участков зоны. Погасание пламени наступает одновременно во всем объеме зоны циркуляции при значении  $\alpha_n$  в определяющей области, равном коэффициенту избытка воздуха при срыве горения гомогенной смеси в рассматриваемых условиях.

Срывные значения  $\alpha$  соответствуют полному составу набегающей смеси, если на участке от форсунок до стабилизатора  $\phi \geq 0,55 \div 0,6$ . При  $\phi < 0,55 \div 0,6$  срыв горения в определяющей области зависит от величины  $\alpha_n$ .

Появление капель топлива в зоне циркуляции при уменьшении  $\phi$  не отражается заметным образом на температуре газа в определяющей области. По всей вероятности, основные затраты тепла на испарение капель происходят в слое смешения, где находится уносимое со стабилизатора неиспарившееся топливо, а также капли из близлежащих к стабилизатору слоев основного потока. Уменьшение температуры в слое смешения неизбежно должно было бы привести к сужению пределов стабилизации пламени по местному составу по сравнению со срывной характеристикой гомогенной смеси, если бы был справедлив контактный механизм стабилизации пламени. Поскольку ухудшение устойчивости горения экспериментами не зафиксировано, то, следовательно, на стабилизацию влияют те процессы в слое смешения, а объемные газофазные реакции в ядре зоны циркуляции. Наиболее мелкие капли, увлеченные турбулентными пульсациями в глубь зоны, и топливо, стекающее в нее непосредственно с тыльной поверхности стабилизатора (это показали визуальные наблюдения), существенного влияния на температуру горения газофазных реакций не оказывают.

*Поступила в редакцию 13/III 1981*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Аполлонов, В. Н. Груздев, А. В. Талантов.— В сб.: Горение в потоке. Вып. 1. Казань: КАИ, 1976.
2. В. Л. Аполлонов, В. Н. Груздев, А. В. Талантов.— В сб.: Горение в потоке. Вып. 2. Казань: КАИ, 1978.
3. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
4. А. В. Талантов. Изв. вузов. Авиационная техника, 1978, 3.