

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

НОВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ

Т. И. Алексеева, Л. М. Новикова
(Москва)

Многочисленные исследования срыва пламени с плохообтекаемых тел проводились с целью создания надежных способов стабилизации горения в камерах различных двигателей. Диапазон изученных отношений площадей поперечных сечений стабилизатора и канала составлял $\beta=0,01-0,6$ [1, 2], что связано с предельно допустимым загромождением поперечных сечений реальных камер сгорания. В этом диапазоне изменения загромождения потока для срывных характеристик плохообтекаемых тел типична монотонно возрастающая зависимость предельной скорости набегающего потока с увеличением размера стабилизатора. В работе [3] показано, что при умеренном загромождении канала ($\beta \leq 0,64$) стабилизатор не оказывает влияния на характеристики турбулентности потока и соответственно на процесс горения. Поэтому срывной предел для стабилизаторов при таком загромождении определяется в основном размером поджигающего источника (зоны рециркуляции), объем которого пропорционален характерному размеру стабилизатора.

Экспериментальными исследованиями стабилизации пламени на плохообтекаемых телах при умеренном загромождении сечения канала апробированы существующие упрощенные расчетные модели и критерии срыва [2, 4]. Определяющим параметром в этих критериях является время пребывания смеси в зоне рециркуляции.

В ряде случаев возможно применение стабилизаторов со степенью загромождения до 0,9. При этом срывные характеристики качественно отличаются от известных ранее. На рис. 1 представлена зависимость скорости истечения горючей смеси из горелочного сопла на пределе срыва, полученная при стабилизации пламени в цилиндрических кварцевых туннелях с внезапным расширением [5]. Диапазон исследованных отношений диаметров туннеля и сопла составлял $D/d=1,5-9,1$. При этом отношение площадей поперечных сечений стабилизатора и канала (туннеля) $\beta=1-(d/D)^2$ изменялось соответственно от 0,55 до 0,98. Срывная скорость в зависимости от степени стеснения факела в туннеле имеет максимум при $D/d \approx 4,5$.

Исследования [6] по стабилизации пламени на дисках, значительно загромождающих канал, показали, что имеется тенденция уменьшения срывной скорости при увеличении размера стабилизатора. Показано, что при размещении в канале ($D=35$ мм) дисков с диаметрами $d_{ст}=27, 30, 33$ мм (соответственно $\beta=0,59; 0,73; 0,89$) область устойчивой работы при сжигании бедных, частично подготовленных смесей сужается с ростом размера диска.

Существующие упрощенные критерии срыва, содержащие в той или иной форме критическое время пребывания смеси в зоне рециркуляции, качественно описывают лишь возрастающую ветвь срывной характеристики. В двух основных расчетных моделях срыва [2] зона рециркуляции рассматривается либо как реактор идеального смешения (модель Лонгвелла), либо как нагретое тело, отдающее тепло в набегающий поток конвекцией (модель Хитрина). Обе модели дают прямо пропорциональную зависимость между размером стабилизатора и срывной скоростью.

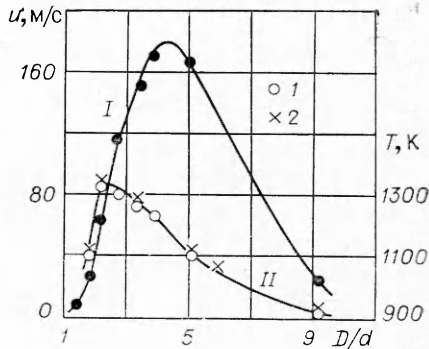


Рис. 1. Зависимости срывной скорости (I) и температуры в зоне рециркуляции (II) от степени стеснения потока в туннеле, $d=11$ мм.
1 — $\alpha=0,3$; 2 — $\alpha=1,15$, скорость истечения смеси из сопла 30 м/с.

Физические предпосылки моделей Лонгвелла и Хитрина неправомерны в случае стабилизации пламени в туннеле с внезапным расширением. Следует отметить, что обе расчетные модели срыва пламени разработаны в 60-х годах и их авторы не располагали экспериментальными данными о тепломассообменных и кинетических характеристиках зоны рециркуляции, а также достаточно полными сведениями о срывных характеристиках различных стабилизаторов.

Более поздние исследования показали, что скорость тепловыделения в зоне рециркуляции значительно ниже, чем в гомогенном реакторе в режиме погасания. В зонах рециркуляции горелочного туннеля [7] и за плохообтекаемым телом [8] эффективная скорость реакции, а значит, и тепловыделения, составляет не более 8—15% от значений в реакторе Лонгвелла [9].

Кроме того, в туннеле с внезапным расширением предел стабилизации пламени зоной рециркуляции значительно выше, чем нагретым телом. Это подтверждается характером движения пламени в керамических туннелях на срывных режимах. При сжигании богатых горючих смесей пламя отрывается от горелочного сопла и мгновенно перебрасывается на срез туннеля, т. е. накалившаяся внутренняя поверхность керамического туннеля не может стабилизировать пламя, оторвавшееся от сопла. При этом скорость потока в туннеле значительно ниже скорости истечения смеси из сопла. Низкий предел стабилизации нагретой поверхностью подтверждается также результатами исследований [10], проведенных для случая поперечного натекания потока метано-воздушной смеси на раскаленную керамическую поверхность, имеющую температуру 1360—1650 К; при этом скорость срыва составила $u_c = 8$ м/с при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,2$.

Наличие максимума срывной характеристики при стабилизации пламени в туннеле можно объяснить изменением интенсивности тепломассообмена между струей горючей смеси, истекающей из сопла, и зоной рециркуляции. Этот процесс зависит от параметров турбулентного обмена, а также от тепловой энергии зоны рециркуляции, характеризующейся температурой газов в ней. Исследования показали, что температура в зоне рециркуляции сильно зависит от размеров зоны и имеет максимум при $D/d \approx 2$, как это видно на рис. 1, II. Измерения температуры газов в зоне рециркуляции проводились вблизи плоскости сопла горелки (на расстоянии 4 мм от закрытого торца туннеля) в двух точках: в середине кольца $(D-d)/2$ (точка 1) и на расстоянии 3,0 мм от края сопла (точка 2). Значения температуры в данных точках измерений практически совпадают, что свидетельствует о слабом влиянии теплоотдачи в окружающую среду на процессы в корневой зоне факела. Максимум температуры продуктов сгорания в зоне рециркуляции в туннелях различных диаметров свидетельствует о том, что зона рециркуляции в туннеле существенно влияет на процесс горения.

Интенсивность тепломассообмена в турбулентных потоках определяется пульсационными составляющими скоростей, концентраций и температуры. На рис. 2 показано влияние степени стеснения изотермической струи на пульсационные составляющие скорости потока [11]. Величина $\epsilon_m = (\sqrt{u'^2}/u_m)_{\max}$ характеризует максимум уровня турбулентности на оси ограниченной изотермической струи, где u_m — скорость на оси струи, u' — пульсационная составляющая скорости. Уровень турбулентности в ограниченной струе зависит от отношения диаметров канала и сопла и имеет максимум приблизительно при $D/d = 4,0$. С увеличением стеснения струи, т. е. при $D/d < 4,0$, уровень турбулентности падает, и в пределе при $D/d = 1,0$, когда имеет место трубное течение, $\epsilon_m = 0,05$. При $D/d > 4,0$ с уменьшением степени стеснения струи интенсивность турбулентности также падает, и в пределе при $D/d \rightarrow \infty$ $\epsilon_m = 0,2$, что характерно для свободной струи. Опыты [11] показали, что ограниченная изотермическая струя вырождается в свободную при $D/d \geq 10$.

С увеличением D/d протяженность зоны рециркуляции увеличивается, но при больших значениях D/d ограниченная струя по турбулентным параметрам вырождается в свободную. При этом скорость обратного потока падает [11], что приводит к уменьшению интенсивности тепломассообмена в ограниченном факеле.

В соответствии с изменением характера течения в туннеле в зависимости от степени стеснения струи предел срыва ограничен, с одной стороны, пределом для трубных течений — скоростью срыва, равной скорости распространения пламени у стенки трубы, а с другой — пределом срыва в свободном факеле при стабилизации пламени на кромке горелочного сопла. Как известно, эти пределы существенно ниже срывных пределов в туннеле с внезапным расширением, что подтверждает возможность существования максимума скорости срыва в зависимости от степени стеснения струи горючей смеси.

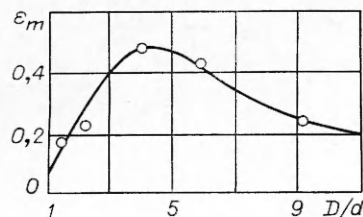


Рис. 2. Зависимость уровня турбулентности на оси ограниченной изотермической струи от параметра D/d [11].

Очевидно, что при стабилизации горения в канале с помощью плохообтекаемых тел (диски, шайбы, конусы и т. д.) с различной степенью загромождения канала физическая картина течения, а значит и зависимость срывной скорости от размеров стабилизатора, будут аналогичны рассмотренными для туннеля. Различия стабилизации плохообтекаемыми телами и внезапным расширением туннеля состоит лишь в форме зоны рециркуляции и ее расположения относительно набегающего потока горючей смеси.

Поступила в редакцию
18/VIII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. I. P. Longwell. Fourth Symposium (International) on Combustion, 1972, p. 90.
2. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.
3. А. В. Таланов. Горение в потоке. М., «Машиностроение», 1978.
4. В. К. Баев, П. К. Третьяков. ФГВ, 1972, 8, 1, 46.
5. Т. И. Алексеева, Л. М. Новиков, О. Г. Рогинский. Газовая промышленность, 1976, 12.
6. H. Kremer, E. Minx, R. Rawe. Flammen Stabilität bei Gasbrennern mit Gebälse. Forschungsberichte des Landes des Nord — Rhein — Westfalen, Nr. 2567, Westdeutscher Verlag, Essen, 1976.
7. G. Schäfer. Gas — Wärme — Inter., 1974, 4, 5, 115.
8. N. Howe, G. Sipman, A. Vranos. IX-th Symposium (International) on Combustion, 1963, p. 36.
9. I. Longwell, E. Forst, M. Weis. Ind. Eng. Chem., 1953, 45, 1629.
10. В. А. Балин, О. Н. Ермолаев, С. Н. Шорин. Теория и практика сжигания газа. Л., «Недра», 1972.
11. Гидродинамика и теория горения потока топлива. Под ред. Б. В. Канторовича. М., «Металлургия», 1971.

ОПТИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ БЕЗГАЗОВЫХ СОСТАВОВ

В. А. Андреев, В. М. Мальцев, В. А. Селезнев

(Москва)

К системам безгазового горения, в которых реакция протекает целиком в конденсированной фазе, относятся, в частности, системы, используемые в СВС-процессе [1]. Развиваемая при горении таких систем температура (до 4000 К) приводит к световому излучению сплошного спектра горящих составов [2].

В работе проведены экспериментальные измерения максимальной температуры горения и максимальной интегральной светимости в спектральном диапазоне 400—1200 нм ряда составов безгазового горения. Определялся также интегральный в этом оптическом диапазоне коэффициент излучения вещества в зоне максимальной температуры, численно равный отношению измеренной интегральной светимости к интегральной светимости абсолютно черного тела при измеренной температуре горения.

Определение указанных характеристик проводилось цветовым методом, основанном на измерении относительной интенсивности излучения в ряде длин волн [3], на установке, описанной в [4]. Интегральная светимость волны горения определялась с помощью блока диафрагм и фотоумножителя. Блок диафрагм выделял нормальную составляющую полусферического излучения образца, которая попадала на фотоумножитель. Калибровка измерительных каналов проводилась с помощью температурных эталонных ламп. Точность измерения температуры ± 80 К, интегральной светимости ± 10 Вт/см². Образцы горели в бомбе постоянного давления в среде аргона и азота при давлениях 1—50 атм.

В качестве объектов исследования выбраны образцы, спрессованные из стехиометрических смесей порошков металлов (титана, циркония и гафния) и металлоидов (бора и углерода). Исходный размер частиц порошков титана менее 63 мкм, циркония и гафния менее 40 мкм, аморфного бора и углерода (ламповая сажа) менее 1 мкм. Относительная плотность прессования образцов 0,4. Прессованные образцы имели прямоугольную форму с размерами 9×9×12 мм³. Выбор исследованных систем определялся тем, что данные композиции, согласно термодинамическому расчету [5], имеют небольшие адиабатические температуры горения по сравнению с другими составами безгазового горения. Поэтому от этих составов следовало ожидать наибольшую интегральную светимость.