

К ВОПРОСУ О СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

В. Л. Зимонт, В. М. Левин, Е. А. Мещеряков
(Москва)

Одним из важных для технических приложений способов стабилизации горения газообразных топлив в сверхзвуковых потоках является использование зон рециркуляции, образующихся в выемке на стенках канала или за уступом¹ [1—6]. Задача обеспечения устойчивого горения в канале при этом заключается в отыскании таких размеров стабилизатора, которые обеспечивали бы горение внутри зоны стабилизатора (необходимое условие) и поджигание основного потока. Первая часть задачи, т. е. организация устойчивого горения собственно в зонах рециркуляции при сверхзвуковых скоростях внешнего потока, является самостоятельной и может быть решена независимо.

В [5, 6] предложен метод теоретической оценки границ устойчивого горения в рециркуляционных зонах за уступом и в выемке при обтекании их сверхзвуковым потоком гомогенной горючей смеси, основанный на тепловом механизме срыва горения, предполагающий гомогенность состава в застойной зоне и использующий известные газодинамические методы расчета параметров массо- и теплообмена между внешним потоком и застойной зоной (типа модели Корста для уступа).

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования границ срыва горения и воспламенения водорода в кольцевой выемке при ее обтекании сверхзвуковым потоком воздуха и подаче горючего непосредственно в застойную зону, а также некоторые экспериментальные данные, относящиеся к стабилизации с помощью выемки процесса горения в цилиндрическом канале.

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в [7]. Установка состояла из подогревателя 1 (использовался огневой подогрев воздуха), форкамеры 2 и цилиндрического канала 3 (рис. 1). Подогреватель заканчивался кольцевым соплом, обеспечивающим для потока окислителя число $M_n \approx 2,8$. Струя топлива в смеси с воздухом истекала из форкамеры соосно потоку окислителя с числом $M_c \approx 2,4$ через сверхзвуковое сопло с диаметром выхода 20 мм; температура торможения струи $T_{0c} = 280$ К. При исследовании критических режимов горения собственно в выемке соосная подача горючего не осуществлялась, и весь водород подавался в выемку.

Рабочая часть установки состояла из двух или трех цилиндрических отсеков длиной 320 и внутренним диаметром 70 мм с отсеком стабилизации длиной 110 мм, имеющим кольцевую выемку и устанавливаемым за первым отсеком. Глубина выемки 25, ширина 50 мм. Отсек с выемкой и отсеки канала охлаждались водой. Конструкция отсека позволяла вдвигать водород в выемку тангенциально через два диаметрально расположенных отверстия ($d = 3$ мм) в дне выемки. Расход водорода измерялся с помощью сменных шайб с диаметром критических сечений 0,5 и 1,0 мм. Для принудительного воспламенения смеси в выемке ставилась свеча зажигания. Наличие или отсутствие горения в выемке легко регистрировалось по показанию вольфрам-рениевой термонары, устанавливаемой внутри стабилизатора (горячий спай выдвигался на 5 мм над дном выемки). Наличие горения в канале регистрировалось по показаниям статического давления на стенке.

В опытах статическое давление в канале перед выемкой $p \approx 55$ кПа. Температура торможения потока окислителя в подогревателе $T_{0н}$ варьи-

¹ Приводимая в статье библиография не претендует на полноту.

рвалась в диапазоне 300—2000 К. В процессе экспериментов изменялись полная температура потока окислителя или расход водорода вплоть до достижения границ самовоспламенения и срыва горения в выемке. Расход водорода изменялся в диапазоне 0,03—4 г/с.

На рис. 2 крестиками показаны границы самовоспламенения и кружочками — срыва горения при вынужденном воспламенении в выемке, представленные в переменных $T_{оп}$ — Γ . Безразмерный параметр вдува $\Gamma = G_{H_2} F_k / G F_1$, где F_k — площадь поперечного сечения канала, F_1 — боковая поверхность выемки, G — расход воздуха, G_{H_2} — расход водорода, подаваемого в выемку. Штриховые линии на рис. 2 проведены через экспериментальные точки.

Оказалось, что воспламенение в выемке указанных размеров происходит при $T_{оп} \geq 1150$ К, параметр Γ при этом изменяется в диапазоне $(0,2 \div 1,7) \cdot 10^{-4}$. При снижении температуры самовоспламенение водорода в данных условиях не происходит. Однако, будучи подожженной искрой, смесь в выемке горит устойчиво уже в значительно более широком диапазоне параметров $T_{оп}$ и Γ . Эксперименты показывают, что горение в выемке в этом случае можно организовать даже в холодном ($T_{оп} \approx 300$ К) потоке окислителя. Параметр Γ в зависимости от $T_{оп}$ изменяется в диапазоне $(0,2 \div 3,4) \cdot 10^{-4}$, что соответствует диапазону изменения суммарного коэффициента избытка окислителя $43 \leq \alpha_{\Sigma} \leq 500$ ($\alpha_{\Sigma} = G/L_0 G_{H_2}$, L_0 — стехиометрический коэффициент). Вид граничных кривых для самовоспламенения и срыва горения указывает на наличие оптимальных с точки зрения поджигания основного потока условий в выемке, которые, судя по данным рис. 2, реализуются при $\Gamma \approx 0,7 \cdot 10^{-4}$. Измерения с помощью термопары показывают, что в этих условиях температура продуктов сгорания в выемке превышает 1900 К (в ряде случаев происходило сгорание термопары).

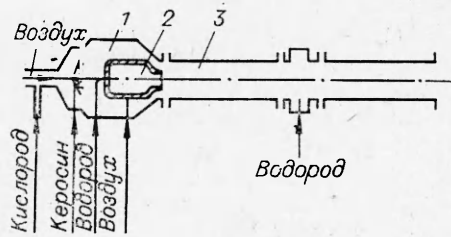


Рис. 1.

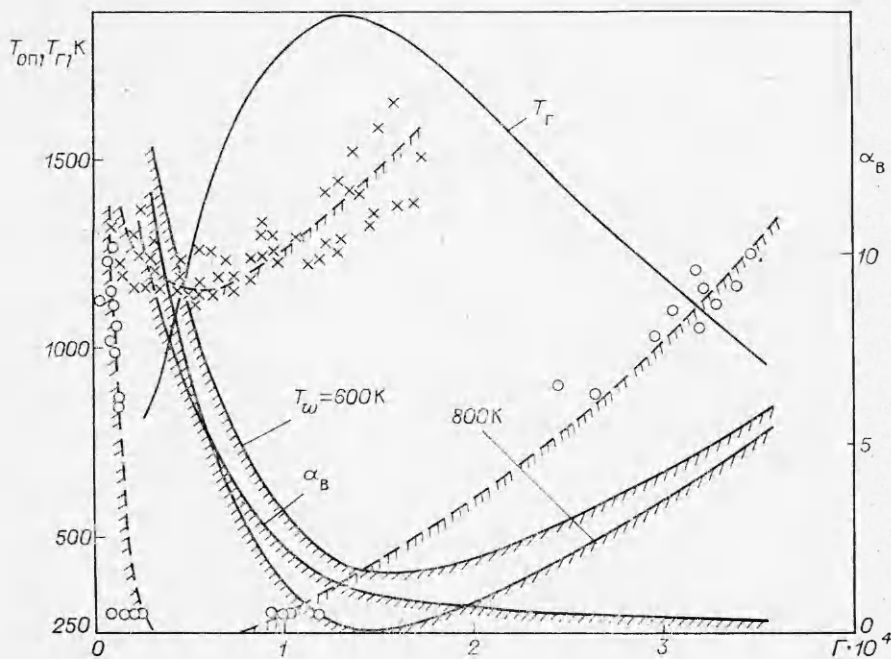


Рис. 2.

С помощью предложенной в [5, 6] расчетной методики предпринята попытка теоретически оценить границы срыва горения в выемке для условий проведенных экспериментов и сравнить их с экспериментальными. Отличие от упомянутых работ состояло в том, что в расчетную методику вводились поправки, учитывающие тепловые потери в стенку выемки, которые в настоящих опытах были существенными (например, температура газа в зоне рециркуляции при отсутствии вдува водорода в опытах составляла 800—900 К при температуре торможения набегающего потока 1000—1200 К). Тепловые потери ΔQ_w учитывались приближенно по формуле $\Delta Q_w = \bar{\alpha}_w F_w (T_r - T_w)$, где F_w — площадь выемки; T_r — температура газа в выемке при срыве горения (рассчитывалась по теории гомогенного реактора); T_w — температура стенки выемки; $\bar{\alpha}_w$ — средний по поверхности выемки коэффициент теплоотдачи, который для геометрии и условий течения в проведенных опытах, согласно [8], принимался равным $0,91\alpha_f$; α_f — коэффициент теплоотдачи на стенке перед выемкой рассчитывался по известным соотношениям для пластины [9].

Другое отличие проведенного расчета от [5, 6] состояло в том, что в этих работах рассматривалось течение гомогенной горючей смеси, набегающей на выемку, т. е. коэффициент избытка окислителя в выемке известен, а здесь его необходимо определить на основании известного значения расхода вдуваемого водорода G_{H_2} и найденного в процессе расчета параметра массообмена между внешним потоком и зоной рециркуляции.

Ввиду того, что в эксперименте температура стенки выемки точно не контролировалась, расчеты проводились для некоторой средней по режимам температуры T_w . На рис. 2 для иллюстрации влияния этого параметра на результаты расчетов приведены границы горения, полученные при $T_w = 600$ и 800 К. Представлены также рассчитанные температуры газа $T_r(\Gamma)$ и коэффициенты избытка окислителя в выемке $\alpha_w(\Gamma)$ при срыве, соответствующие $T_w = 600$ К. Как следует из приведенных данных, максимальная расчетная температура газа в выемке при срыве горения и, следовательно, оптимальные условия для поджигания основного потока имеют место при $\Gamma \approx 1,3 \cdot 10^{-4}$, что превышает соответствующее опытное значение примерно в 2 раза. Расчет, таким образом, дает лишь качественное соответствие экспериментальных и теоретических границ срыва. Для получения количественного соответствия интенсивность смешения в расчете должна быть увеличена в 1,5—2 раза (это приводит к такому же уменьшению Γ), что, возможно, связано с предпосылками расчетной модели (см. [6]) и, в частности, с учетом влияния тепловыделения в слое смешения на массообмен между внешним потоком и застойной зоной, с предположением о гомогенности состава в рециркуляционной зоне и т. д.

Эксперименты по обнаружению стабилизирующего эффекта выемки при горении в канале и основной подаче топлива через форкамеру, а также вдуве части водорода (до 10% от основного) в выемку показали, что рассмотренная схема стабилизации позволяет реализовать надежное воспламенение водорода в случае значительного обогащения смеси (вплоть до α_w , соответствующего тепловому заклиниванию потока) и при снижении $T_{оп}$ до 1100 К. Как правило, наличие горения в выемке вызывало воспламенение основного горючего в канале.

В экспериментах без подачи водорода в выемку наблюдалось явление гистерезиса. Повышение полной температуры потока окислителя до 2000—2200 К в канале приводило к самовоспламенению смеси, при последующем уменьшении температуры окислителя горение в потоке имело место вплоть до $T_{оп} \approx 1200$ К, после чего наблюдался срыв пламени. Это явление сохранялось при многократном повторении цикла с некоторым разбросом по температуре на обоих пределах для разных, но сравнительно мало отличающихся значений α . Подобные эксперименты, повторенные в канале без выемки, дали примерно те же результаты, т. е. наличие задержки срыва горения (воспламенения), по-видимому, не связано с

выемкой. Поэтому на рис. 3 для обоих случаев результаты объединены — области погасания и воспламенения заштрихованы (светлыми значками обозначены данные для канала с выемкой, темными — без выемки).

Явление гистерезиса при сверхзвуковом горении наблюдалось и ранее [10], но оно приписывалось стабилизирующему влиянию либо нагретой стенки (для неохлаждаемых камер), либо зоны рециркуляции при выдуве горячего со стенок. В рассматриваемых опытах стенка охлаждалась, а струя горячего подавалась соосно. Поэтому наличие гистерезиса, по-видимому, может быть связано с присутствием в потоке скачков уплотнения, сопровождающихся появлением застойных зон, вызванных тепловыделением. На возможность образования рециркуляционных зон внутри сверхзвукового потока при горении указывалось в [11]. Гистерезис в стационарных детонационных волнах наблюдался в [12].

Важно в прикладном отношении исследование влияния горения в выемке на положение границ самовоспламенения и срыва горения в канале. Проведенные эксперименты с подачей части водорода (10%) в выемку показали, что в рассматриваемых условиях при уменьшении температуры потока раньше срыва горения происходит заклинивание потока на входе в канал, после чего горение имеет место в дозвуковом потоке. Поэтому дальнейшее исследование этого вопроса целесообразно проводить в расширяющемся канале, в котором, как известно, трудно организовать устойчивое горение.

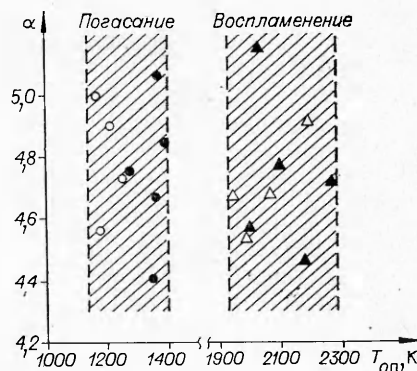


Рис. 3.

Поступила в редакцию 13/III 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Баев, П. К. Третьяков. ФГВ, 1972, 8, 4.
2. R. C. Orth, J. M. Cameron. AIAA Paper, 1974, N 74—1161.
3. А. К. Мажуледер, Д. Мажид. Тр. амер. общ. инж.-мех. Сер. Е, 1973, 4.
4. В. К. Баев, Г. В. Клиничик и др. ФГВ, 1976, 12, 3.
5. В. Л. Зимонт, В. К. Иванов, С. Х. Оганесян.— В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
6. Е. А. Мещеряков, О. В. Макашева. ФГВ, 1976, 12, 6.
7. В. Л. Зимонт, В. М. Левин, Е. А. Мещеряков. ФГВ, 1978, 14, 4.
8. A. F. Charwat, C. F. Dewey et al. JAS, 1961, 28, 7.
9. В. С. Авдусевский и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1975.
10. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
11. A. Ferry. Ann. Rev. of Fluid Mech., 1973, 5.
12. R. Gross, W. Chinitz. JAS, 1960, 27.