

кристаллизации приводит к росту температуры горения выше ликвидусной. Этим обстоятельством можно, по-видимому, объяснить непрерывное повышение  $T_1$  с увеличением  $T_n$  для эвтектического состава  $Ti + 65\% Ni$ , соответствующего совместной кристаллизации соединений  $TiNi$  и  $TiNi_3$ .

Полученные результаты показывают, что методы горения могут быть использованы для построения высокотемпературной части диаграммы состояния.

*Поступила в редакцию 26/1 1982*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов. СВС-процесс: теория и практика горения. Препринт. Черногловка, 1980.
2. В. М. Маслов, И. И. Боровинская, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1976, 12, 5.
3. В. И. Итин, А. Д. Братчиков и др. ФГВ, 1981, 17, 3.
4. В. И. Итин, А. Д. Братчиков, А. В. Ленинских. ФГВ, 1981, 17, 5.
5. В. И. Итин, В. И. Хачии и др. Изв. АН СССР. Неорганические материалы, 1980, 16, 11.
6. В. М. Маслов, И. И. Боровинская, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1978, 14, 5.
7. И. И. Новиков, И. И. Боровинская, А. Г. Мержанов.— В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черногловка, 1975.
8. L. Kaufman, I. Nesor. Calphad, 1978, 2, 1.
9. А. Д. Братчиков, А. Г. Мержанов и др. Порошковая металлургия, 1980, 1.
10. Е. А. Некрасов, Ю. М. Максимов, А. П. Алдушин. ФГВ, 1981, 17, 2.
11. Е. А. Некрасов, В. К. Смоляков, Ю. М. Максимов. ФГВ, 1981, 17, 3.

### О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ С ПОМОЩЬЮ ФОРКАМЕРНОГО ФАКЕЛА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ $H_2$

*В. П. Богославский, И. Б. Самойлов*  
(Москва)

Изучалось влияние основных параметров струи продуктов сгорания водородно-воздушных смесей на концентрационные пределы стабилизации пламени предварительно перемешанных пропано-воздушных смесей в турбулентном потоке. Предпринята также попытка определения критериев моделирования процесса стабилизации при использовании форкамерных устройств.

#### Схема экспериментальной установки и особенности методики

Поджигающая струя вытекала из кварцевой камеры — форкамеры объемом  $0,5 \text{ см}^3$ . Камера сгорания основной смеси представляет собой прямоугольный канал  $10 \times 20 \times 180 \text{ мм}$  с кварцевыми окнами. Форкамерный факел вытекал соосно основному потоку, как показано на рис. 1. Объемная доля форкамерной смеси по отношению к основной в разных опытах составляла 1—8%. Скорость потока изменялась в диапазоне 3—20 м/с.

Значение коэффициента избытка в основной смеси  $\alpha_{см}$ , при котором в камере сгорания возникает устойчивое горение, характеризует концентрационный предел стабилизации пламени в данных условиях. Предварительные опыты показали, что рассмотрение предела по срыву пламени нецелесообразно, так как он существенно зависит от температуры стенок камеры.

Наличие предела определялось визуально и по результатам измерения температуры на выходе из камеры сгорания. Типичная зависимость этой

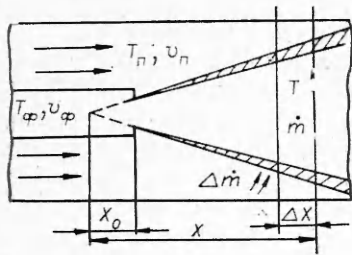


Рис. 1. Схема взаимодействия форкамерного факела с потоком основной смеси.

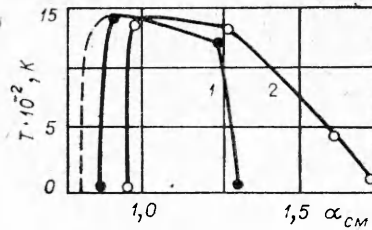


Рис. 2. Температура на выходе из камеры сгорания при стабилизации горения (штриховой линией показан предел, определенный по срыву пламени в горячей камере).

$\alpha_{\phi}$  : 1 — 0,9, 2 — 0,4.

температуры от  $\alpha_{см}$  показана на рис. 2. Видно, что при коэффициенте избытка воздуха в форкамере  $\alpha_{\phi} < 1$  имеют смысл только богатые пределы стабилизации, т. е. пределы с  $\alpha_{см} < 1$ . В случае бедных основных смесей ( $\alpha_{см} > 1$ ) догорание  $H_2$ , содержащегося в форкамерном факеле, осложняет регистрацию предела стабилизации пламени в основном потоке. По этой причине пределы такого рода в данной работе не рассматривались.

### Основные результаты измерений

На рис. 3—4 приведены результаты измерений предельных значений  $\alpha_{см}$  в зависимости от  $\alpha_{\phi}$  и скорости форкамерного факела  $v_{\phi}$ .

Как видно на рис. 3, эффективность стабилизации оказывается наибольшей ( $\alpha_{см}$  на пределе наименьшим) при  $\alpha_{\phi} \approx 0,7$ . Однако различие предельных значений  $\alpha_{см}$  для  $\alpha_{\phi}$  в диапазоне 0,6—1 невелико. В случае  $\alpha_{\phi} > 1$  эффективность стабилизации понижается: ее либо вообще не удается осуществить, либо она наблюдается при меньших скоростях потока. Существенно, что это имеет место для  $\alpha_{см} < 1$ , когда подмешивание продуктов сгорания, содержащих  $O_2$ , приводит к увеличению нормальной скорости пламени в смеси. Влияние скорости истечения форкамерного факела видно из данных на рис. 3 и 4. Можно сделать вывод, что существует оптимальное значение  $v_{п}/v_{\phi}$ , при котором достигается максимальная эффективность использования форкамерного факела.

Результаты измерений, представленные на рис. 5, отражают влияние времени пребывания смеси в форкамере  $\tau$  на пределы стабилизации. Величина  $\tau$  изменялась соответствующим перемещением стабилизатора в форкамере. При этом изменение температуры факела не превышало  $100^{\circ}$  (5—7%). Сопоставление кривых на рис. 5 показывает, что в случае  $\alpha_{\phi} > 1$  значение  $\tau$  существенно влияет на пределы стабилизации пламени. Так, уже при  $\tau = 3,3$  мс она становится невозможной. В случае  $\alpha_{\phi} < 1$  роль  $\tau$  менее значительна. Объяснение этих результатов, следуя [1], мож-

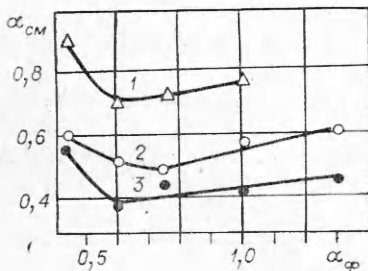


Рис. 3. Пределы стабилизации при разных  $\alpha_{\phi}$ ;  $v_{п} = 10$  м/с.  $v_{\phi}$ , м/с: 1 — 80, 2 — 16, 3 — 6.

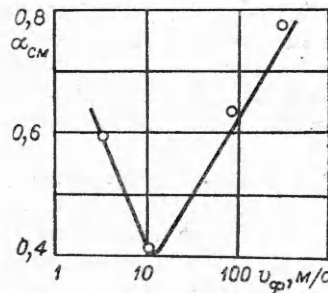


Рис. 4. Пределы стабилизации при разных  $v_{\phi}$ ;  $v_{п} = 6$  м/с.

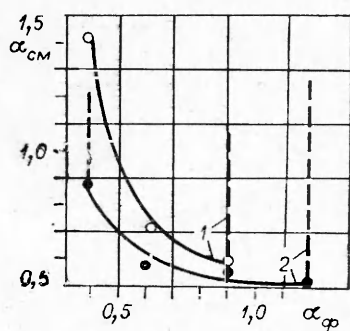


Рис. 5. Влияние времени пребывания  $\tau$  мс на пределы стабилизации.  
 $\tau$ , мс: 1 — 3,3, 2 — 1,3.

но проводить, основываясь на зависимости от  $\tau$  концентрации активных центров в форкамерном факеле. При этом, однако, нужно иметь в виду, что во всех опытах такого рода необходимо, чтобы аэродинамические условия в зоне стабилизации пламени при изменении  $\tau$  сохранялись не только в среднем, но и локально. С учетом этого требования нельзя признать корректными выводы

работы [1], где в соответствующих опытах контролировалась только средняя температура на выходе форкамеры.

В целом рассмотренные результаты измерений указывают, по-видимому, на важную роль как химических, так и аэродинамических факторов при форкамерном способе стабилизации горения в потоке. Повышение эффективности этого способа по мере обогащения форкамерной смеси в диапазоне  $\alpha_{\text{ф}}$  от 1 до 0,7 при одновременном снижении влияния  $\tau$  позволяет объяснить химическую активность форкамерного факела богатого состава наличием в нем значительных концентраций молекулярного водорода. Как известно [2], период задержки воспламенения  $\text{H}_2$  на 2—3 порядка меньше, чем в случае  $\text{CН}_4$  и близких к нему углеводородов. Если учесть также расширение пределов воспламенения смеси при добавлении в нее  $\text{H}_2$ , то объяснение приведенных экспериментальных результатов, по крайней мере на качественном уровне, не встречает затруднений.

#### Моделирование стабилизации горения в потоке

Теоретический анализ условий стабилизации в данной работе основан на модели поджигания в турбулентном потоке с помощью нагретой газовой струи [3]. Следуя [3], предположим, что поджигание форкамерным способом обусловлено повышением температуры в потоке основной смеси в результате подмешивания к ней горячих продуктов сгорания, вытекающих из форкамеры. Вследствие этого начинается реакция окисления в зоне подмешивания, сопровождающаяся выделением тепла. При определенных условиях скорость тепловыделения превзойдет скорость рассеивания тепла и температура в этой зоне начнет повышаться до температуры продуктов горения  $T_r$ . Рассматривая баланс энергии в элементе объема  $\Delta X S_x$  форкамерного факела (см. рис. 1), можно записать следующее уравнение:

$$\frac{1}{\dot{m}} \frac{d\dot{m}}{dX} \frac{1}{\eta} \frac{d\eta}{dX} = \frac{RT(1 + C_0)}{\nu \rho \mu \eta} \frac{\delta\rho}{dt}, \quad (1)$$

где  $\dot{m}$  — поток массы через сечение  $X$  (с учетом подмешивания);  $\eta = (T - T_{\text{н}})/(T_r - T_{\text{н}})$  — безразмерная температура;  $\nu$  — скорость потока в зоне смешения;  $p$  — давление;  $\mu$  — молекулярный вес;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $C_0$  — стехиометрическое массовое отношение топлива к воздуху;  $\delta\rho/dt$  — скорость сгорания топлива.

При выводе (1), как и в (3), сделаны следующие основные допущения:

- 1) скорость тепловыделения много меньше скоростей тепло- и массопереноса, вследствие чего температура и концентрация по сечению форкамерного факела постоянны;
- 2) зона реагирования отделяется от свежей смеси переходным слоем, толщина которого меньше диаметра факела.

Для анализа уравнения (1) воспользуемся, согласно [3, 4], полуэмпирическим законом подмешивания форкамерного факела к основному потоку

$$m = K (M \rho_{\Pi})^{1/2} X \frac{1 + 2 \left| \frac{v_{\Phi} - v_{\Pi}}{v_{\Phi} + v_{\Pi}} \right|}{3} = \frac{m_0}{X_0} X \frac{1 + 2 \left| \frac{v_{\Phi} - v_{\Pi}}{v_{\Phi} + v_{\Pi}} \right|}{3}, \quad (2)$$

где  $M = \frac{\pi d_0^2}{4} v_{\Phi} \rho_{\Phi}^2$  — импульс форкамерного факела;  $X_0$  — расстояние до выходного отверстия форкамеры от условной точки, в которой диаметр факела обращается в нуль (см. рис. 1);  $d_0$  — диаметр выходного отверстия форкамеры.

Используя (1) и (2), а также условие воспламенения  $d\eta/dX = 0$ , получим соотношение для  $X_b$  — расстояния до сечения, в котором выполняется условие воспламенения (индекс «в» соответствует условиям воспламенения основного потока)

$$1/X_b = A \cdot T_b / \eta_b \cdot W,$$

где  $A = R(1 + C_0)/\nu \rho$ ;  $W$  — скорость химической реакции. Поскольку при  $X \leq X_b$  изменение температуры определяется в основном процессом подмешивания, то из (1), полагая  $W = 0$ , можно установить, что

$$\eta_b = X_0 \eta_0 / T_b,$$

где индекс 0 относится к параметрам на выходе из форкамеры.

Подставляя это выражение в (1) и используя, согласно [3, 4], полуэмпирическое выражение

$$X_0 = \frac{3d_0}{(1 + 2 \left| \frac{v_{\Phi} - v_{\Pi}}{v_{\Phi} + v_{\Pi}} \right|)} \left( \frac{T_{\Pi}}{T_{\Phi}} \right)^{1/2},$$

получим в первом приближении

$$\gamma = \frac{9}{\xi} \left[ \frac{1}{2\xi} + \left( \frac{1}{4\xi^2} + \frac{\mu \nu \rho}{d_0 R (1 + C_0) \Delta T w} \right)^{1/2} \right], \quad (4)$$

где  $\gamma = X_b/d_0$ ;  $\xi = 1 + 2 \left| \frac{v_{\Phi} - v_{\Pi}}{v_{\Phi} + v_{\Pi}} \right|$ ;  $\xi = T_{\Pi}/(T_{\Phi} - T_{\Pi})$ ;  $\Delta T = T_r - T_{\Pi}$ . Если рассматривать  $d_0/\nu$  и  $\mu \rho/R(1 + C_0)\Delta T w$  в качестве характерных времен соответственно диффузионных и химических процессов  $\tau_d$  и  $\tau_x$  и учесть, что  $\tau_x/\tau_d \gg 1$ , то (4) можно представить в следующем виде:

$$\gamma = 9/\xi \cdot (\tau_x/\tau_d)^{1/2}. \quad (5)$$

Нетрудно убедиться, что соотношения (4) и (5) позволяют качественно объяснить полученные экспериментальные результаты. В частности, из (5) следует, что зависимость  $\gamma$  от  $v_{\Phi}$  имеет минимум. В связи с этим можно предполагать, что (4) и (5) представляют собой условия, обеспечивающие моделирование процесса стабилизации горения при использовании форкамерных устройств в достаточно турбулизованном потоке.

Согласно (5), химические факторы при форкамерной стабилизации пламени связаны с величиной  $\tau_x$ . Для изучения этой связи воспользуемся известной моделью форкамерно-факельного воспламенения [1, 5, 6], согласно которой продукты сгорания, вытекающие из форкамеры, достаточно быстро перемешиваются с основной смесью в турбулентных молях, так что начальная стадия их последующего воспламенения (период индукции) протекает практически в изотермических условиях. В этом случае для цепных разветвленных процессов автокаталитического типа, к которому относится воспламенение углеводородов, Н. Н. Семеновым [7] получено уравнение

$$\eta = q \nu_0 [\exp \tau - 1 - (1 - 1/q)\tau]. \quad (6)$$

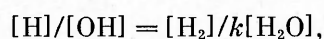
Здесь  $\eta$  — доля прореагировавшего вещества;  $q$  — отношение скоростей реакций разветвления цепей и превращения исходного вещества;  $\nu_0$  — относительная скорость инициирования реакций;  $\tau$  — относительная величина периода индукции.

Принимая  $\eta = 0,01$  и учитывая, что, согласно [8],  $q \approx 1$ , с помощью (6) получим  $\tau \sim \ln [(0,01 + \nu_0)/\nu_0]$ .

Если в смеси имеется начальная концентрация активных центров  $R_0$ , то можно считать, что  $\nu_0 = R_0/C_0$ , где  $C_0$  — начальная концентрация исходного вещества, например  $\text{CH}_4$ . В этом случае зависимость  $\tau$  от  $R_0$  принимает следующий вид:

$$\tau \sim \ln [(0,01C_0 + R_0)/R_0]. \quad (7)$$

Это соотношение показывает, что для изотермических условий влияние начальной концентрации активных центров на процесс воспламенения определяется логарифмической зависимостью, причем величина  $R_0$  находится под знаком логарифма в качестве слагаемого с относительно большим членом. Вследствие этого при  $\bar{n}_0 \leq 1\%$  величина  $\tau$  меняется в несколько раз при изменении начальной концентрации активных центров на несколько порядков. Аналогичный результат получен в работе [8], где на основе уравнения (7) рассматривалась кинетическая схема воспламенения метана. В то же время начальная температура факела является эффективным средством воздействия на величину  $\tau$ , поскольку соответствующая зависимость в любом случае экспоненциальна в условиях, когда энергия активации процесса воспламенения достигает 30—40 ккал [2]. Так, при повышении температуры в поджигающей струе от 1000 до 1500 К величина  $\tau$ , согласно экспериментальным данным [2], сокращается на три порядка. Поскольку при этом измеренные максимальные концентрации активных центров в пламени углеводородно-воздушных смесей не превышают 1%, то по крайней мере в случае изотермического воспламенения ясно, что никакое реальное изменение  $R_0$  в форкамерном факеле не приведет к снижению  $\tau$ , если это изменение  $R_0$  связано со значительным понижением температуры факела. К тому же в настоящее время нет каких-либо оснований считать, что обогащение состава горючей смеси может привести к росту общей концентрации активных центров в пламени. Это, в частности, видно на примере пламен водородно-воздушных смесей, когда выполняются соотношения



где  $k$  — константа равновесия реакции  $\text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{OH}$ . Согласно [9], отношение концентрации атомов  $\text{H}$  в пламени богатого и стехиометрического составов не превосходит трех. В то же время написанные выше отношения в случае горения стехиометрической смеси близки к 0,1 для  $T \approx 2000$  К, которая соответствует условиям измерений в [9]. Из этих данных следует, что концентрация гидроксила  $\text{OH}$  в пламени водорода при  $\alpha = 1$  превосходит концентрацию атомов  $\text{H}$  в таком пламени в случае  $\alpha < 1$ . Химическая активность  $\text{OH}$ , если судить по величине константы скорости взаимодействия этой частицы с  $\text{C}_2\text{H}_2$  и другими углеводородными молекулами, также превосходит активность атомов  $\text{H}$ .

Таким образом, при обогащении горючей смеси концентрация активных центров ни количественно, ни с точки зрения химической активности в пламени не возрастает (по крайней мере для  $\alpha \leq 1$ ).

С учетом сказанного выше объяснение результатов опытов, в которых наблюдается некоторое повышение эффективности форкамерных устройств при обогащении форкамерной смеси, можно объяснить повышением в форкамерном факеле концентрации молекулярного водорода. Энергия активации процесса его воспламенения примерно в 2 раза меньше, чем в случае углеводородов [2]. Вследствие этого в зоне смешения факела с основной смесью процесс воспламенения при  $\alpha_\phi$  протекает с меньшей средней энергией активации, которая, как и температура, входит в показатель экспоненты в выражении для зависимости  $\tau$  от  $T$ . Поэтому величина этого показателя может остаться неизменной, несмотря на понижение температуры форкамерного факела.

Поступила в редакцию 22/IV 1981

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Гуссак.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
2. Е. С. Щетников. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
3. Н. Phillips. Comb. Flame, 1972, 19, 2, 187.
4. В. Н. Груздев, Ю. В. Виноградов и др. Горение в потоке. Тр. КАИ. Казань, 1974.
5. Л. А. Гуссак, О. Б. Рябиков и др. Докл. АН СССР, 1973, 208, 5, 1126.
6. L. A. Gussak, M. G. Turkish. Stratified Charge Engine Conference. The Institute of Mechanical Engineers. London, 1976.
7. Н. Н. Семенов. Докл. АН СССР, 1944, 43, 8, 360.
8. J. R. Creighton. A Critique of the Theory for Gussak's "LAG-Process" Engine. SAE Paper N 790249, 1979.
9. А. Е. Вишневский, В. П. Богославский, И. Б. Самойлов. Изв. АН СССР. Сер. химическая, 1976, 4, 749.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ ВО ВСТРЕЧНОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

*Ю. М. Аннушкин, А. Н. Князев, Н. С. Лошенкова*  
(Москва)

Для летательных аппаратов различного назначения с воздушно-реактивными двигателями (ВРД) наряду с применяемыми в настоящее время углеводородными топливами [1, 2] рассматривается возможность перспективного использования (в прямоточных и форсажных камерах сгорания) высокоэнергетических синтетических углеводородных топлив с повышенной плотностью [3, 4], бороводородных топлив (типа пентаборана), а также бороуглеводородных топлив [5] в виде химических (синтезированных) соединений типа алкилированных боратов [6] (например, триэтилбор [7, 8], этилдекаборан — топливо Д-3) или смесей высокоэнергетических тяжелых углеводородов с бороводородными топливами. Смесей бороводорода с тяжелыми углеводородами широко исследуются в Лаборатории прикладной физики США [9].

Закономерности горения и организации рабочего процесса в прямоточных и форсажных камерах сгорания при использовании жидких углеводородных топлив изучены в достаточной для практики степени [10, 11], тогда как рабочий процесс в камерах сгорания, работающих на борсодержащих топливах (механизм горения которых отличен от механизма горения углеводородных топлив), изучен недостаточно. Слабо исследовано, в частности, горение распыленного борсодержащего топлива во встречном, сносном и спутном высокотемпературных воздушных потоках, когда температура воздуха превышает температуру термического разложения топлива ( $T_B^* > 680$  К).

В задачу настоящей работы входило экспериментальное определение геометрических характеристик зон испарения и горения распыленного во встречном потоке воздуха бороуглеводородного топлива и сравнение их с аналогичными характеристиками углеводородного топлива и газообразного водорода. В опытах использовалась одна конструкция прямоточной форсунки, параметры набегающего воздуха (скорость, давление, температура) сохранялись примерно одинаковыми.

Предварительный этап исследования, проведенный с подачей топлив в спутный, сносный и встречный потоки воздуха, показал, что устойчивое горение исследуемых жидких топлив при  $T_B^* = 700$  К и скорости воздуха  $w_B \sim 31$  м/с при выбранной схеме форсунки оказалось возможным лишь в случае встречной подачи топлива. Эта схема и принята для дальнейшего исследования.

Экспериментальная установка состояла из сужающегося аэродинамического сопла с диаметром 160 мм, топливных систем жидкости и газа и систем измерения. В рабочей части аэродинамического сопла (в потен-