

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Видавский, Г. В. Хильченко и др. Докл. АН СССР, 1974, 219, 5, 1157.
2. Г. В. Хильченко, И. И. Короткевич и др. Письма в ЖТФ, 1976, 2, 6, 263.
3. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1972, 204, 2, 366.
4. И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов.— В сб.: Металлотермические процессы в химии и металлургии. Новосибирск: Наука, 1971.
5. И. П. Новиков, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1974, 10, 2, 201.
6. Термические константы веществ. Справочник/Под ред. В. П. Глушко. Вып. IV, М.: Изд-во АН СССР, 1970; вып. V, 1971; вып. VII, 1974.
7. И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 4.
8. В. П. Бондаренко. Порошковая металлургия, 1976, 12, 168, 49.
9. В. В. Горлевский, А. Н. Ораевский и др. Химия высоких энергий, 1976, 10, 5, 443.
10. А. Г. Мержанов, А. Э. Аверсон. Современное состояние теории зажигания. Препринт. М.: ИХФ АН СССР, 1970.
11. В. П. Стовбун, Т. И. Кедрова, В. В. Барзыкин, ФГВ, 1972, 8, 3, 349.
12. Г. В. Самсонов. Силициды и их использование в технике. Киев: Изд-во АН УССР, 1959.
13. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1968, 4, 1, 20.
14. P. V. Phang, A. P. Hardt. Comb. and Flame, 1974, 22, 3, 3, 323.
15. J. L. Deming, J. H. Weber, L. C. Tao. Comb. and Flame, 1970, 14, 3, 375.

О ГРАНИЦАХ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ ФОРКАМЕРНЫМ ФАКЕЛОМ

Е. С. Семенов, О. Б. Рябиков

(Москва)

Форкамерные эффекты — это такие явления, как промотирование, т. е. улучшение горения рабочей смеси, а также расширение границ воспламенения и стабилизации горения под воздействием форкамерного факела. В работе приводятся результаты экспериментального исследования этих границ при горении смеси природного газа с воздухом в условиях потока с расходами рабочей смеси до $3 \cdot 10^3$ см³/с и смеси метана с воздухом до 370 см³/с. Влияние факела на другие характеристики здесь не исследовалось.

Форкамерное сжигание топлива в печах технологического и термического нагрева металла исследовалось в [1] в отношении стабилизации горения, влияния на структуру поверхности и угар металла, на характеристики технологического процесса нагрева. Влияние же форкамерного факела на стабилизацию и промотирование горения исследованы мало. Это и явилось причиной постановки таких исследований.

Цель данного исследования установить, насколько форкамерный способ расширяет границы стабильного горения, какие составы наиболее эффективны для стабилизации горения бедных и богатых рабочих смесей, как зависят границы от диаметра выпускного канала d_n , числа каналов, состава α_f и расхода смеси (воздуха Q_n). Роль активных частиц в процессе воспламенения и горения вытекает из основополагающей теории цепных химических реакций [2] и подтверждена в [3—5]. В данной работе приведены экспериментальные доказательства роли химико-кинетического фактора в целом без выделения отдельно роли активных частиц в форкамерной стабилизации горения.

Методика определения границ воспламенения и горения. При воздействии форкамерного факела реагировать начинает запредельная ос-

новная смесь с $\alpha_0 > 2$, что обнаруживается по повышению температуры на срезе основной камеры в 120 мм от форкамеры при увеличении подачи основного газа. Следовательно, бедная граница воспламенения и стабилизации горения в данном случае условна. В сущности при запредельном горении природного газа или метана смесь не воспламеняется, а имеет место лишь инициированное форкамерным факелом горение. Достаточно убрать факел и горение основной смеси прекращается.

Условно за нижнюю границу инициированного горения принята такая величина α_0 , при которой температура на срезе форкамеры возрастает на 250°C по сравнению с температурой потока основного воздуха при горении только одной форкамерной смеси. В отличие от бедной богатая граница воспламенения определялась по вспышке и появлению пламени на срезе горелки, а богатая граница стабилизации горения — по стабилизации пламени на форкамерной струе. Условной богатой границей стабилизации горения принимались богатые составы α_0 , при которых температура на срезе горелки начинала превышать 780°C .

О параметрах форкамеры. Объем форкамеры V_ϕ определялся условием: время пребывания продуктов в форкамере $\tau_{\text{пр}}$ не должно превышать 3—4 мс, исходя из времени рекомбинации активных частиц, равно по [6] приблизительно 10 и 5 мс для атомов Н и О соответственно. Тогда

$$V_\phi = Q'_\phi \tau_{\text{пр}} < 4 \cdot 10^{-3} \cdot Q'_\phi \varepsilon, \quad (1)$$

где ε — степень расширения продуктов сгорания; Q'_ϕ — расход смеси. В опытах $\tau_{\text{пр}}$ составляло для полусферических форкамер от 2,76 до 0,98 мс при изменении Q_ϕ от 120 до 370 $\text{см}^3/\text{с}$.

На рис. 1 приведены границы воспламенения основной смеси при $Q_\phi = 160 \text{ см}^3/\text{с}$ и различных d_n , а на рис. 2 — границы стабилизации горения основной смеси форкамерным факелом при $d_n = 5 \text{ мм}$ и различных Q_ϕ . Четко проявляется высокая химическая активность форкамерного факела богатых смесей в виде значительного расширения бедных границ стабилизации горения рабочей (основной) смеси далеко за пределы нормального горения метано-воздушных смесей ($\alpha_{\text{пр}} = 2$ и 0,6). Одновременно с этим четко выражен, хотя и менее заметен форкамерный эффект бедных смесей в виде расширения богатых границ воспламенения до $\alpha_0 = 0,48$ и стабилизации горения до $\alpha_0 = 0,50$ при $\alpha_\phi \approx 1,5$ (начальная температура рабочей смеси 130°C , форкамерной смеси 250°C во всех опытах).

Влияние состава форкамерной смеси на воспламенение и сгорание рабочей смеси иллюстрируется рис. 3, где показаны изменения по α_ϕ энтальпии факела и границ воспламенения бедной (α_0/α_{01}) и богатой (α_{01}/α_0) смесей. Энтальпии продуктов сгорания взяты из [7]. Значение α_{01} относится к $\alpha_\phi = 1$. Видно, что на одной из ветвей границы воспламенения удовлетворительно согласуются с ходом энтальпии, а на другой резко расходятся. Следовательно, на расширение границ воспламенения определяющее влияние оказывает не тепло форкамерного факела, а химико-кинетический либо гидродинамический фактор. Последний — снижение скорости форкамерной струи — при отклонении α_ϕ от стехиометрии действует одинаково как на богатой, так и на бедной ветвях, однако ход кривых 1, 2 и 3 резко различен. Отсюда следует, что на богатых смесях вступает в действие мощный химико-кинетический фактор, резко расширяющий область воспламенения бедных смесей. С другой стороны, заметно химико-кинетическое действие бедного форкамерного факела при воспламенении богатых основных смесей, однако оно выражено слабее.

Влияние диаметра канала на воспламенение основной смеси (см. рис. 1), так же как и влияние расхода смеси (рис. 4), согласуется с теорией зажигания потока горючей смеси горячими струями [8]. Эта теория

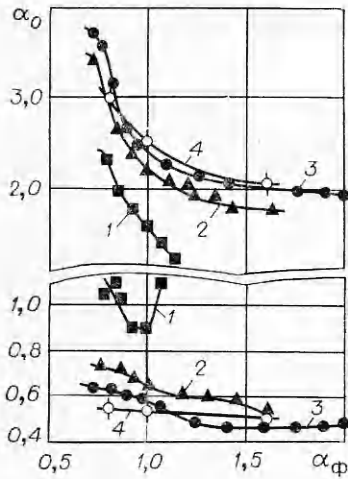


Рис. 1. Границы воспламенения основной смеси; расход форкамерного воздуха $Q_{\phi} = 160 \text{ см}^3/\text{с}$, основного воздуха $Q_{\text{в}}^{\text{осн}} = 2000 \text{ см}^3/\text{с}$.
 $d_k, \text{мм}$: 1 — 3, 2 — 4, 3 — 5, 4 — 15.

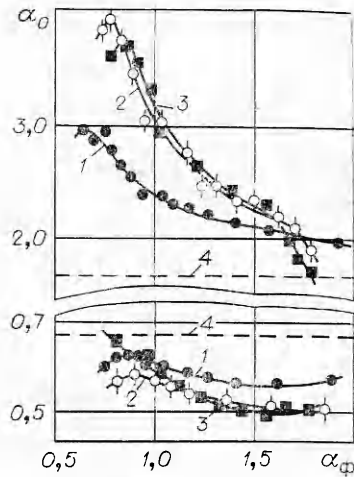


Рис. 2. Границы стабилизации горения основной смеси; $d_k = 5 \text{ мм}$, $Q_{\text{в}}^{\text{осн}} = 2000 \text{ см}^3/\text{с}$.
 $Q_{\phi}, \text{см}^3/\text{с}$: 1 — 160, 2 — 250, 3 — 300, 4 — 0.

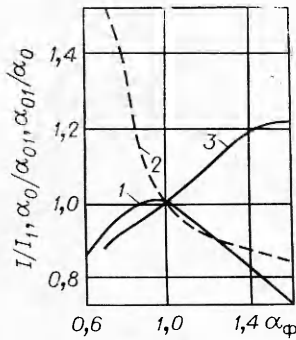


Рис. 3. Влияние состава форкамерной смеси.
 1 — энтальпия форкамерного факела; 2 — бедная граница воспламенения; 3 — богатая граница воспламенения.
 $Q_{\text{в}}^{\text{осн}} = 2000 \text{ см}^3/\text{с}$, $Q_{\phi} = 160 \text{ см}^3/\text{с}$, $d_k = 5 \text{ мм}$.

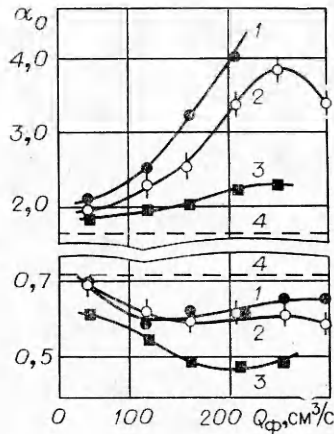


Рис. 4. Границы воспламенения основной смеси; $d_k = 5 \text{ мм}$, $Q_{\text{в}}^{\text{осн}} = 2000 \text{ см}^3/\text{с}$.
 α_{ϕ} : 1 — 0,8, 2 — 1,0, 3 — 1,6; 4 — без форкамеры.

рассматривает два фактора, влияющих на воспламенение при изменении относительной скорости поджигающей струи и поджигаемой смеси: приведенный к скорости основного потока диаметр поджигающей струи (тепловой фактор) и интенсивность перемешивания струи с основным потоком (гидродинамический фактор). Усиление перемешивания ухудшает воспламенение, т. е. действует аналогично уменьшению диаметра струи. Когда $v_{\phi} > v_0$ (v_{ϕ} — скорость струи), оба фактора действуют в разных направлениях и трудно сказать заранее, какой будет превалировать. При $v_{\phi} < v_0$ оба фактора действуют в одном направлении, и тогда выгодно увеличивать расход поджигающего газа.

В рассматриваемых условиях к двум упомянутым присоединяется третий фактор — химическая активность форкамерной струи. Он дейст-

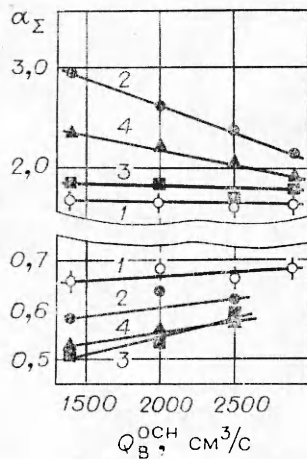


Рис. 5. Границы стабилизации горения основной смеси с помощью форкамерного факела и пилотного пламени; $d_k = 5$ мм.
 1 — без форкамеры; 2 — $\alpha_{\text{ф}} = 0,8$; 3 — $\alpha_{\text{ф}} = 1,6$; 4 — $d_k = 15$ мм, $\alpha_{\text{п}} = 1,0$.

Сравнение границ воспламенения при одном и четырех выпускных каналах форкамеры одинакового суммарного сечения показало, что одна широкая струя дает более широкую область воспламенения, чем четыре узких, подтверждая выводы теории воспламенения горячими струями.

На рис. 5 показаны границы стабилизации горения (зависимость суммарного состава смеси на бедной и богатой границах от расхода основного воздуха $Q_v^{\text{осн}}$). Для сравнения приведены границы горения основной смеси без форкамеры и пилотного пламени. Видно, что форкамерный факел богатой смеси весьма активен в отношении горения бедных рабочих смесей и имеет большое преимущество перед пилотным пламенем с $\alpha_{\text{п}} = 1$. В отношении горения богатых основных смесей пилотное пламя и бедный форкамерный факел в данных условиях практически равноценны и отодвигают границу стабилизации за пределы нормального горения.

Скорость форкамерной струи $v_{\text{ф}} = Q'_{\text{ф}} \varepsilon / F_k$, где F_k — площадь сечения выпускного канала. Полагая выгодным для воспламенения соотношение $v_{\text{ф}} = v_0$, получим оптимальный диаметр канала для стабилизации горения.

$$d_k \approx 2\sqrt{Q'_{\text{ф}} \varepsilon / \pi v_0} \quad (2)$$

При $Q'_{\text{ф}} = 175 \text{ см}^3/\text{с}$, $\varepsilon = 5,5$ и $v_0 = 6$ м/с, получим $d_k = 1,42$ см. Из рис. 1 видно, что границы воспламенения при $d_k = 5$ и 15 мм близки. Имея в виду, что при этом $v_{\text{ср}}$ и v_0 равны 50 и 6 м/с соответственно, можно предположить, что разница между $v_{\text{ф}}$ и v_0 до 40 м/с при $d_k \geq 5$ мм не играет большой роли, если $\tau_{\text{пр}}$ не превышает $2 \cdot 10^{-3}$ с.

Условие наилучшего горения, по-видимому, требует не только хорошей стабилизации горения (т. е. широких границ воспламенения), но и значительной турбулизации потока рабочей смеси. В этом случае интенсифицируется горение при почти неизменной средней скорости потока, что должно привести к повышению полноты выгорания, сокращению основной зоны горения и выходу из основной камеры более нейтральных продуктов горения. Это может быть достигнуто увеличением скорости форкамерной струи, т. е. уменьшением d_k . Следовательно, выражение (2) дает верхний предел величины d_k . Оптимальным с точки зрения промоти-

рует в ту же сторону, что и уширение поджигающей струи. Из рис. 1 видно, что увеличение d_k от 3 до 5 мм расширяет границы воспламенения. При $d_k = 5 \div 15$ мм границы воспламенения почти не изменяются. То же имеет место и в отношении границ стабилизации горения (см. рис. 2). Увеличение $Q_{\text{ф}}$ расширяет поджигающую струю и повышает подачу активных частиц в основной поток. Это дает положительный эффект до $Q_{\text{ф}} = 250 \text{ см}^3/\text{с}$. В дальнейшем начинает преобладать противоположное действие роста турбулизации основного потока. Этот фактор играет положительную роль в ускорении горения основной смеси и отрицательную — в отношении ее воспламенения и стабилизации горения. Таким образом, влияние форкамерного факела на воспламенение и сгорание основной смеси проявляется как посредством химически активных продуктов, так и через внесение тепла и турбулизацию основного потока. Последняя же ведет к диссипации тепла и активных частиц.

рования горения диаметр канала должен быть меньше для увеличения турбулизации основной смеси. Однако при этом нельзя уходить за границы ее воспламенения, чтобы обеспечить одновременно с промотированием и стабилизацию горения основной смеси. Закономерности такого условия еще предстоит выяснить.

*Поступила в редакцию
3/IX 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. ЦНИИИформтяжмаш. Сборник № 13-73-3, 1973.
2. Н. Н. Семенов. Цепные реакции. Л.: Госхимтехиздат, 1934.
3. В. Я. Басевич, С. М. Когарко. Кинетика и катализ, 1965, 6, 23.
4. Л. А. Гуссак, О. В. Рябиков и др. Докл. АН СССР, 1973, 208, 1126.
5. Л. А. Гуссак. Бюл. изобр., 1974, 38.
6. О. В. Рябиков и др. Докл. АН СССР, 1973, 208, 5, 1126; 1974, 215, 2, 370.
7. Н. Ф. Дубовкин. Справочник по углеводородным топливам и продуктам их сгорания. М.—Л., 1962.
8. Е. С. Шетинков. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ИНИЦИИРУЕМОГО ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЗАЖИГАНИЯ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

*В. М. Бойко, П. Воланьский, В. Ф. Климкин
(Новосибирск, Варшава)*

Существуют различные способы возбуждения химических реакций в твердых веществах (например, с помощью нагревания, удара, ионизирующего излучения, света [1]). Использование светового излучения для подвода тепла позволяет избежать искажений, вносимых самим источником инициирования, и практически безынерционно воздействовать на вещество. Появление лазерных источников света, обладающих высокой интенсивностью, монохроматичностью и параллельностью излучения, значительно расширило возможности для исследования закономерностей зажигания при высоких плотностях и больших скоростях подвода энергии. При этом источник излучения может быть удален на значительное расстояние от места зажигания, а величина и плотность выделяемой энергии могут варьироваться в широком диапазоне.

В одной из первых работ по лазерному зажиганию конденсированных веществ [2] сфокусированный пучок импульсного неодимового лазера, работающего в режиме свободной генерации, использовался для воспламенения капель циркония диаметром 300—600 мкм в кислороде и смеси кислорода с гелием и аргоном.

В последующих работах лазерная техника успешно применялась для зажигания частиц металлов (например, [3]), твердых ракетных топлив и различных их составляющих (например, [4]), а также частиц дымного пороха [5]. Ряд динамических эффектов при зажигании двухосновных твердых ракетных топлив лазерным излучением наблюдался в работе [6]. Тщательный анализ экспериментальных работ показывает, что лазерная техника успешно применялась при исследовании закономерностей зажигания конденсированных систем в условиях высоких тепловых нагрузок, что позволило получить ряд новых результатов, касающихся механизма развития процесса и перехода к режиму стационарного горения.

Данная работа посвящена дальнейшему развитию нового экспериментального подхода к исследованию процессов горения твердых энер-