

Л. Н. ХИТРИН

К ВОПРОСУ О БЕСПЛАМЕННОМ ГОРЕНИИ ГАЗОВ

(Представлено академиком Г. М. Кржижановским 26 V 1951)

На основании сложившейся практики беспламенного сжигания газов (1) под этим методом следует понимать организацию горения в присутствии накаливаемых огнеупоров. Скорость горения в этих условиях должна определяться взаимодействием, по крайней мере, трех основных процессов: 1) воспламенения и горения газовой смеси в объеме, 2) переноса горючих газообразных веществ на поверхность огнеупора, 3) горения последних на поверхности огнеупора. В настоящее время имеется достаточно сведений (2-5) для того, чтобы вынести суждение о характере взаимодействия и роли гомогенных и гетерогенных процессов в различных условиях.

Теплонапряженность пламенного горения определяется длиной факела L_{ϕ} , на которой достигается необходимая полнота сгорания. Эта длина складывается из длины зоны воспламенения L_{ϕ} и длины зоны догорания L_{δ} . Зона воспламенения, часто называемая ядром факела, определяется соотношением скорости истечения из насадка w и скорости распространения пламени u . При условии, что w постоянна по сечению среза насадка

$$L_{\phi} = \frac{wd}{2u}, \quad (1)$$

где d — диаметр насадка. В отличие от L_{ϕ} величина L_{δ} связана исключительно с реакционными свойствами газовой смеси. При данных горючих свойствах длина зоны L_{δ} тем больше, чем больше скорость потока. Поэтому зона L_{δ} , почти незаметная при небольшой скорости течения, становится значительной при больших скоростях.

В табл. 1 приведены величины средней теплонапряженности горения окиси углерода (6) $[Q]_{\text{гор}}$ в зависимости от коэффициента полноты сгорания α ; величина $[Q]_{\text{гор}}$ относится только к зоне L_{δ} .

Таблица 1
Смесь CO + воздух; $\alpha=1,0$

α в %	84	88	90	95	96,5
$[Q]_{\text{гор}} \frac{\text{млн. ккал}}{\text{м}^3 \text{час}}$	3550	1060	728	250	200

Практически средние теплонпряжения значительно снижаются за счет величины $L_в$ и незаполненных факелом частей топки. При учете длины $L_в$ видимое теплонпряжение равняется*:

$$[Q]_{\text{вид}} = \frac{[Q]_{\text{гор}}}{1 + \frac{w}{2u} \alpha \frac{[Q]_{\text{гор}}}{\chi q G/S}}, \quad (2)$$

где S — площадь сечения туннеля (камеры), q — теплотворность газа, G — расход газа.

При одной и той же форсировке горелки G/S теплонпряжение уменьшается с увеличением диаметра горелки (насадка), что видно из табл. 2.

Т а б л и ц а 2

		Диаметр сопла в мм					
		10	50	100	150	200	
$[Q]_{\text{гор}} = 200$ млн. ккал/м ³ час; $\chi = 96,5$; $\alpha = 1$							
$[Q]_{\text{вид}}$	млн. ккал/м ³ час	$w/2u = 2,5$	67	18	9,5	6,4	5
		$w/2u = 5,0$	40	9,5	5,0	3,3	2,5

Из соотношения (2) следует, что значения $[Q]_{\text{вид}}$ приближаются к значению $[Q]_{\text{гор}}$, являющемуся предельным для данной смеси, лишь при прогрессивном уменьшении диаметра струи. Это значит, что при переходе к так называемому микрофакельному (многоструйному) горению возможно достижение теплонпряжений, близких к предельным.

Величина теплонпряженности горения не характеризует, однако степени форсировки газосжигающего устройства. Форсировка горелки (камеры) определяется тем, до какого предела без опасности срыва, горения возможно увеличивать подачу газо-воздушной смеси.

В турбулентном потоке скорость u всегда меньше w . Поэтому ни в одной точке струи турбулентное пламя самостоятельно удерживаться не может, и его существование всегда определяется наличием тех или иных стабилизирующих факторов. Даже в ламинарной струе, как отмечалось автором (7), устойчивой частью обычного бунзеновского пламени является лишь небольшая краевая зона, в которой осуществляется условие $u = w$ и которая является источником зажигания для всей струи. В туннельных горелках, благодаря резкому расширению канала, условия для автостабилизации пламени создаются также по периферии струи на выходе ее из насадка, как и в обычной топке, за счет отвода части горящего газа от факела к его корню (рециркуляция).

Особая геометрия начальной части туннеля является поэтому главным условием устойчивого зажигания струи. Действие накаливаемой керамической стенки способствует повышению устойчивости воспламенения и, надо полагать, приводит к более высокому пределу форсировки, чем другие известные методы стабилизации пламенного горения (8).

В простейшем случае, когда скорости объемного и поверхностного реагирования пропорциональны концентрации горючего компонента, усредненное уравнение горения имеет вид**

* При условии $L_{\phi} = L_{\text{топки}}$

** Метод усредненных уравнений горения разработан А. С. Предводителевым и О. А. Цухановой и эффективно использован в расчетах гетерогенного горения (9,10).

$$\frac{dc}{dz} = - \left(\frac{\kappa}{w} + s_i \frac{\varphi}{1 + \frac{w}{k} \varphi} \right) c. \quad (3)$$

Здесь c — концентрация горючего компонента, например окиси углерода; z — расстояние вдоль зоны горения; κ — константа скорости объемного горения; k — константа скорости поверхностного горения; φ — безразмерная величина, характеризующая интенсивность диффузионного переноса; s_i — удельная реакционная поверхность; в случае горения в круглом канале (туннель) она равна $\frac{4}{d}$, в слое $\frac{6}{d}(1-m)$, где d в одном случае — диаметр канала, в другом — диаметр зерна засыпки, а m — порозность. Из решения уравнения (3)

$$\frac{c}{c_0} = e^{-\frac{\kappa}{w}z} e^{-s_i \frac{\varphi}{1 + \frac{w}{k} \varphi} z}, \quad (4)$$

которое позволяет вести расчет процесса в различных условиях, следует, что в предельном случае, когда роль поверхностного реагирования должна быть максимальной (k очень велико):

$$\frac{c}{c_0} = e^{-\frac{\kappa}{w}z} e^{-s_i \varphi z}. \quad (5)$$

Роль объемного горения тем больше, чем больше температура горения (больше κ), и тем меньше, чем больше скорость потока w .

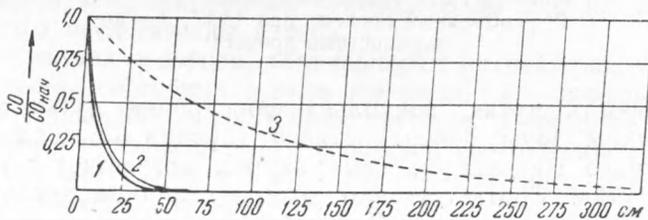


Рис. 1. Горение в канале с активной стенкой. Скорость дутья 10 м/сек (при НТД), диаметр канала 15 мм, температура 1400°. 1 — суммарный поверхностно-объемный процесс, 2 — объемный процесс, 3 — поверхностный процесс

Роль поверхностного горения в данном оптимальном случае зависит только от величины $\varphi = Nu/Pr$ — функции переноса, свойства которой хорошо известны на основании гидродинамических выводов данных теплообмена (например, в случае канала, из формулы Крауссольда) или непосредственно из данных по гетерогенному горению (2, 3, 11, 12)*.

В качестве примера на рис. 1 и 2 показано сгорание окиси углерода в двух сильно отличных условиях — в канале и в слое — как при интенсивном поверхностном горении (1), так и в случае чисто объемного горения. В основу расчета последнего положены имеющиеся данные по макрокинетике пламенного горения окиси углерода (5, 13). Одновременно (3) показано сгорание при чисто поверхностном горении.

Расчет для канала показывает, что горение практически идет как объемный процесс. Больше того, если бы протекало только поверхностное горение, зона горения была бы крайне растянута и для своего

* В работе (12) величина $\psi = \varphi/2$.

практического завершения горение потребовало бы в данном случае ($d = 15$ мм, $w = 10$ м/сек.) длину в 2,5—3 м по сравнению с 40 мм, необходимыми для объемного сгорания (без учета длины ядра факела, т. е. величины L_0); при большем диаметре туннелей, обычно используемых в практике, потребная длина туннеля была бы еще больше.

Таким образом, если смесь обладает способностью к воспламенению, влияние огнеупора на самый процесс горения в туннелях должно быть относительно невелико.

Расчеты для зернистой засыпки показывают существенно отличные результаты. Кривые показывают, что в этом случае ($d = 5$ мм, $w = 1,7$ м/сек.) роль поверхностного процесса сравнима с ролью объемного горения (особенно при более высокой температуре). Преобладающая роль поверхностного процесса будет тем больше, чем

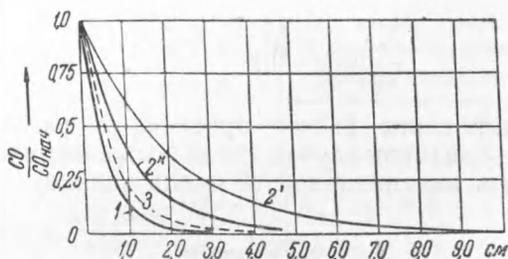


Рис. 2. Горение в слое катализатора. Скорость дутья 1,7 м/сек. (при НТД), диаметр зерна 5 мм, температуры 1400 и 1600°. 1 — суммарный поверхностно-объемный процесс при 1400°, 2' — объемный процесс при 1400°, 2 — объемный процесс при 1600°, 3 — поверхностный процесс

больше скорость дутья, поскольку форсировка дутья заметно не изменяет длины зоны поверхностного горения (3), тогда как длина зоны объемного горения L_0 , как указано, возрастает с увеличением скорости дутья. Соответственно этому величина теплонапряжения горения в засыпке при чисто гетерогенном процессе может быть не только выше теплонапряжения гомогенного горения, но она должна, в противоположность последнему, возрасти почти пропорционально возрастанию дутьевой форсировки.

Оценивая процесс горения в мелкозернистой засыпке, можно поэтому утверждать, что, в отличие от горения в туннеле, в данном случае горение может идти в основном как поверхностный процесс горения, т. е. в основном как беспламенный процесс в точном смысле этого слова.

Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского
Академии наук СССР

Поступило
29 III 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. Б. Равич, Поверхностное беспламенное горение газов, 1949. ² А. С. Предводителей, Л. Н. Хитрин, О. А. Цуханова, Х. И. Колодцев и М. К. Гродзовский, Горение углерода, 1949. ³ З. Ф. Чуханов, ДАН, 53, № 5 (1948); 65, № 5 (1949). ⁴ Я. Б. Зельдович и Н. Н. Семенов, ЖЭТФ, 10, в. 9—10 (1940). ⁵ Я. Б. Зельдович, Теория горения и детонация газов, 1944. ⁶ L. Ubbelohde und O. Donner, GWF, 33, 733 (1914). ⁷ Л. Н. Хитрин, ЖТФ, 7, № 7 (1937). ⁸ J. Longwell, Aeronaut. Sci., 16, № 12, 707 (1949); G. C. Williams, ibid., 16, 12, 714 (1949). ⁹ А. С. Предводителей, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1947). ¹⁰ О. А. Цуханова, там же, № 6 (1947). ¹¹ З. Ф. Чуханов там же, № 10 (1947). ¹² С. А. Гольденберг, там же, № 4 и 5 (1950). ¹³ Н. А. Каржавина, ЖФХ, 19, в. 10—11 (1945).