

Значения q и q_r получены в предположении равенства коэффициента теплопроводности продуктов горения ПХА величине $1,9 \cdot 10^{-4}$ кал/см·сек·°С (при $T = T_n$). В соответствии с этим количество тепла, выделяющееся в реакционном слое к-фазы, составляет 164 ± 6 кал/г и практически не меняется с давлением ($p = 10-60$ атм). Суммарный поток тепла к поверхности горения с ростом давления увеличивается. Однако доля тепла, подводимого из газовой фазы за счет теплопроводности, составляет в том же интервале давлений соответственно от 27 до 8% от общего запаса тепла в к-фазе.

Поступила в редакцию
4/XII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Friedman, R. Nugent a.o. VI-th Symposium on Combustion, 1957.
2. G. B. Levy, R. Friedman. VIII-th Symposium on Combustion, 1960.
3. E. A. Arden, J. Powling, W. A. W. Smith. Combustion and Flame, 1963, 6, 1.
4. J. Powling, W. A. W. Smith. Combustion and Flame, 1963, 7, 3.
5. J. Powling, W. A. W. Smith. X-th Symposium on Combustion, 1965.
6. McAley, S. J. Lee. Heterogeneous Combustion, N. Y.—London, Acad. Press., 1964.
7. G. B. Levy, R. Friedman. IX-th Symposium on Combustion, 1962.
8. Adams, Newman, Robins. IX-th Symposium on Combustion, 1962.
9. L. J. Shannon, E. E. Peterson. AJAA J., 1964, 2.
10. W. A. Roser, S. H. Jпamy, H. Wise. AJAA J., 1966, 4.
11. В. К. Боболев, А. П. Глазкова и др. ПМТФ, 1964, 3.
12. А. А. Зенин. ПМТФ, 1963, 5.
13. А. А. Зенин. ФГВ, 1966, 2, 3.
14. Sabadell, Wenograd, Summerfield. AJAA J., 1965, 3.
15. J. D. Higtower, E. W. Price. XI-th Symposium on Combustion, 1967.
16. J. Powling. XI-th Symposium on Combustion, 1967.
17. H. Selzer. Symposium on Combustion, 1967.
18. С. С. Новиков, П. Ф. Похил и др. Докл. СССР, 1967, 174, 5.
19. N. W. Becksted, J. D. Higtower. AJAA J., 1967, 5, 10.
20. Б. С. Ермолаев, А. И. Коротков, Ю. И. Фролов. Первый Всесоюзный симпозиум по горению (тезисы докладов). М., Изд-во АН СССР, 1968.
21. П. Ф. Похил, Л. Д. Ромоданова, М. М. Белов. Сб. «Физика взрыва», № 3, М., Изд-во АН СССР, 1955.

УДК 662.217.8

ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

А. П. Баскаков, И. В. Кирнос
(Свердловск)

Большое количество работ, посвященных изучению сжигания газообразного топлива в кипящем слое инертного или активного мелкозернистого материала [1, 2] связано прежде всего с широким применением последнего в различных отраслях промышленности и, в частности, с огромными перспективами печей с кипящим слоем для нагрева и термообработки металлов [4]. Для безокислительного и необезуглеро-

живающего нагрева наибольший интерес представляет сжигание богатых топливоздушных смесей с коэффициентом расхода окислителя α , существенно меньшим единицы. Теоретический анализ и опытные данные показывают, что термодинамически равновесные продукты сгорания при температурах выше 800—900°С не окисляют металл, изобарный потенциал окисла которого больше стандартного изобарного потенциала СО, если коэффициент расхода окислителя

$$\frac{\alpha_{\text{Me}}}{\alpha_c} \leq 1 + \frac{1}{n-l} \left[\frac{0,5m}{k k_5 + 1} + \frac{n}{k_5 + 1} \right]. \quad (1)$$

Здесь n, m, l — атомарные доли углерода, водорода и кислорода в топливе с условной формулой $C_n H_m O_l N_o$; k и k_5 — константы равновесия реакций $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$ и $\text{CO}_2 + \text{Me} = \text{MeO} + \text{CO}$; α_c — коэффициент расхода окислителя, ниже которого термодинамически неизбежно образование сажи. При $T > 850^\circ\text{C}$

$$\alpha_c = \frac{n-l}{0,5m + 2n - l}. \quad (2)$$

При сжигании метановоздушных смесей ($\alpha_c = 0,25$) безокислительная для железа среда получается при $\alpha \geq 0,5-0,55$, а необезуглероживающая — при $\alpha \leq 0,25-0,3$.

В теоретическом плане кипящий слой интересен тем, что благодаря его огромной теплопроводности, связанной с интенсивным перемешиванием псевдоожигаемых частиц, горение, особенно при $\alpha < 1$, идет в строго изотермических условиях (см. таблицу). Небольшие отклонения температуры наблюдаются лишь в непосредственной близости от газораспределительной решетки и в зоне, где сказывается влияние вторичного дутья (см. далее). Даже при сжигании стехиометрической смеси, когда в непосредственной близости от решетки выделяются огромные количества тепла, температура в этой зоне обычно лишь на 20—30°С превышает температуру в остальной части слоя.

Распределение температур по высоте печи с кипящим слоем активного шамота (частицы 0,63—1,0 мм) при сжигании в ней метановоздушной смеси

Расстояние от места ввода газовой смеси, мм	Температура, °С	
	опыт 1	опыт 2
0	—	927
100	900	935
200	900	935
300	900	935
400	901	935
500	901	945
600	910	945

Приводимые далее результаты получены в основном в опытной установке, изображенной в правом углу рис. 1. Газовоздушная смесь с $\alpha < 1$ подается в трубу (внутреннюю на рис. 1), заполненную мелкозернистым материалом, псевдоожигает его и сгорает в кипящем слое. Для сжигания продуктов неполного горения в верхнюю часть слоя (в зону всплесков) подается вторичный воздух. Благодаря интенсивному перемешиванию частиц тепло догорания переносится в ниж-

нюю часть слоя, в результате чего в ней можно получить достаточно высокие температуры при весьма низких значениях α . В целях расширения диапазона исследуемых режимов труба помещена в своеобразный термостат с кипящим слоем, имеющий независимый подвод газовой смеси. Термостат сам служит исследовательской установкой большего диаметра при удалении из него внутренней трубы. На полупромышленной установке такого типа диаметром 250 мм без внутренней трубы были, в частности, получены результаты, приведенные в таблице.

Прежде всего следует отметить, что механизм и скорость горения существенно зависят от коэффициента расхода окислителя α . При $\alpha \geq 1$ метан (природный газ) устойчиво и практически без остатка сгорает в кипящем слое инертного мелкозернистого материала уже при температуре выше $800\text{--}850^\circ\text{C}$, а пропан-бутановая смесь — даже при $T \geq 750\text{--}800^\circ\text{C}$. В это же время при $\alpha_c < \alpha < 1$ метан расходуется значительно медленнее.

Из рис. 1 видно, что содержание неразложившегося метана в продуктах сгорания, отбираемых из кипящего слоя, даже при 900°C в десятки раз превышает термодинамически равновесное и оказывается при $\alpha > \alpha_c$ тем больше, чем ниже α . При этом следует подчеркнуть, что, начиная с высоты, на которой поглощается практически весь кислород ($100\text{--}150\text{ мм}$ от решетки), состав продуктов сгорания практически не меняется.

В литературе уже высказывалось предположение [3], что сгорание углеводородных топлив осуществляется в две «видимые» стадии: сначала топливо реагирует с кислородом с образованием H_2O и CO_2 , а затем продукты полного горения взаимодействуют с еще не прореагировавшим топливом с образованием CO и H_2 , причем первая стадия идет значительно быстрее, чем вторая. Конечно, каждая из этих стадий является результатом сложных цепных реакций, механизм которых далеко еще не изучен.

Подтверждением такого двухстадийного процесса являются большие концентрации CO_2 , при $\alpha < 0,6$ значительно превышающие равновесные, и малые концентрации H_2 и CO . Скорости обеих стадий различаются настолько сильно, что при $\alpha \geq 1$, когда вторая стадия отсутствует, метан исчезает на расстоянии $30\text{--}100\text{ мм}$ от решетки при скорости более $0,5\text{ м/сек}$, в то время как при $\alpha = 0,4$ и при скорости всего $0,15\text{ м/сек}$ продукты сгорания содержат более 10% метана (см. рис. 1), причем концентрации его на расстоянии 100 и 500 мм от решетки различаются не более чем на $1\text{--}2\%$, т. е. он почти не реагирует на этом участке.

Большое содержание CO_2 и H_2O в продуктах сгорания приводит к тому, что они окисляют железо даже при весьма низких значениях α . Чтобы получить безокислительную среду, нужно ускорить вторую стадию процесса, что при заданной температуре можно сделать только с помощью катализаторов.

Никелевый катализатор использовался в двух вариантах. В первом он наносился на пористые шамотные частицы ($0,65\text{--}1,0\text{ мм}$), псевдоожигаемые в кипящем слое. Во втором в опытную камеру засыпался

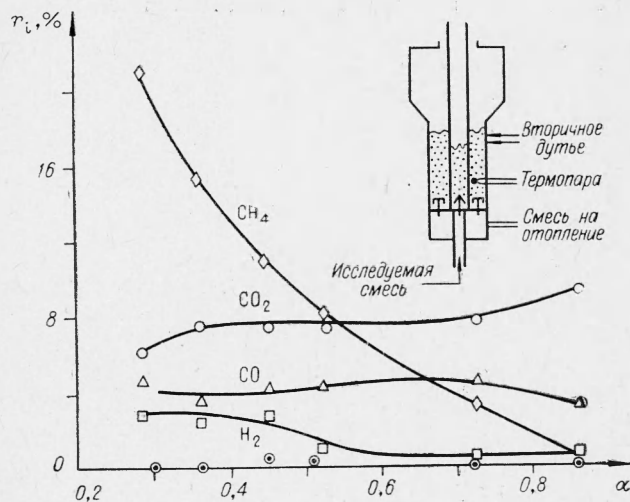


Рис. 1. Зависимость состава продуктов сгорания от коэффициента расхода воздуха при сжигании природного газа в кипящем слое инертного корунда; $w = 0,15\text{ м/сек}$, $h_{\text{тр}} = 200\text{ мм}$, $T = 900^\circ\text{C}$. (В правом верхнем углу представлена схема опытной установки.)

неподвижный слой промышленного высокотемпературного катализатора ГИАП-3, выпускаемого в виде цилиндров длиной и диаметром около 10 мм. Мелкозернистый материал (корунд различных фракций, обычно 0,32 или 0,4) псевдоожигался в порах между частицами катализатора. Специальные исследования показали, что такой псевдоожигаемый в неподвижной насадке кипящий слой оказывается чрезвычайно однород-

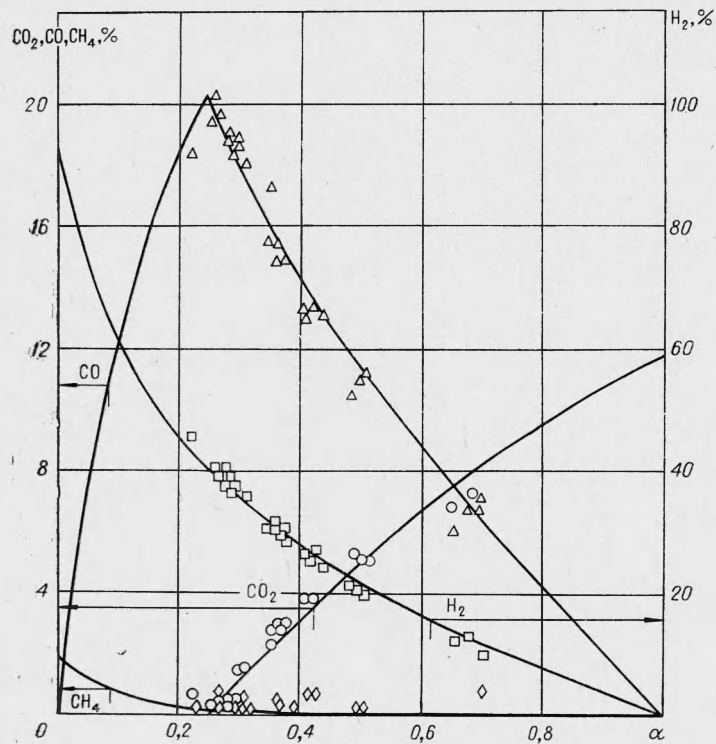


Рис. 2. Зависимость состава продуктов сгорания от коэффициента расхода воздуха при сжигании природного газа в кипящем слое активного шамота; $\omega=0,3$ м/сек; $h_{т.р.}=300$ мм, $T=900^\circ\text{C}$.

Линии — расчетная зависимость термодинамического равновесного состава продуктов сгорания от α ; точки — эксперимент.

ным без характерных для обычного кипящего слоя всплесков и пульсаций давления. При объемных напряжениях по метановоздушной смеси ниже 2500 н/м² · час выше каталитической насадки получался практически равновесный состав продуктов сгорания.

При использовании активных псевдоожигаемых шамотных частиц объемный состав продуктов сгорания выше реакционной зоны в диапазоне режимов $\alpha_c < \alpha < 1$ практически не отличался от равновесного (рис. 2, 3); при $\alpha < \alpha_c$ наблюдалось заметное увеличение объемного содержания метана сверх равновесного. Анализ опытных данных показывает, что при наличии катализатора двухстадийный характер процесса сохраняется: концентрация CO₂ увеличивается по мере уменьшения концентрации кислорода, а затем уменьшается до равновесного. Однако весь процесс заканчивается значительно быстрее.

Как и следовало ожидать, высота зоны стабилизации, на которой продукты сгорания становятся практически равновесными, уменьшается с увеличением температуры кипящего слоя (см. рис. 2) и уменьше-

нием скорости газовой смеси. В указанном диапазоне температур равновесный состав продуктов сгорания слабо меняется с температурой. Применение катализатора, нанесенного на псевдоожигаемые частицы, в сочетании с двухступенчатой подачей воздуха обладает одной особенностью, интересной как в прикладном, так и в теоретическом отношении. Известно, что выделение сажи в процессе горения приводит к постепенному зауглероживанию катализатора и выводу его из строя. Поэтому достаточно длительные опыты на неподвижном катализаторе при $\alpha < \alpha_c$ невозможны. Если катализатором служат псевдоожигаемые частицы, то углерод, оседающий на них в нижней части слоя, выгорает при попадании этих частиц в зону подачи вторичного воздуха, в результате чего углерод не накапливается в слое. Например, при $\alpha = 0,184 < \alpha_c = 0,25$ и температуре 930°C состав газа не меняется в течение всего опыта, длившегося почти 50 ч. Интересно, что выгорание углерода в зоне вторичного дутья, по-видимому, не сопровождается существенным окислением никеля, являющегося катализатором, ибо в противном случае активность его должна бы с течением времени уменьшаться. В практическом отношении такие режимы перспективны для осуществления процессов цементации стали. В теоретическом отношении такая организация процесса интересна тем, что позволяет изучать стационарный процесс неполного горения с образованием сажи при достаточно высоких температурах. Надо отметить, что наличие сажи в слое существенно меняет механизм горения, особенно при сжигании без катализатора. Вновь образующийся углерод является чрезвычайно реакционноспособным, активно соединяясь с кислородом, двуокисью углерода и водяным паром.

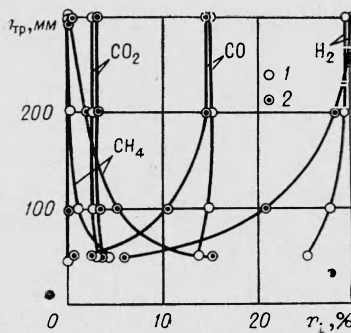


Рис. 3. Распределение концентраций компонентов по высоте камеры; $\omega = 0,285$ м/сек, $\alpha = 0,35$, температура 850°C (1) и 950°C (2).

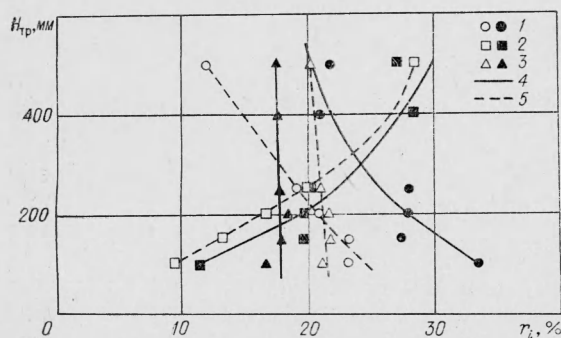


Рис. 4. Распределение состава продуктов сгорания по высоте реактора при сжигании природного газа в предварительно науглероженном слое псевдоожиганного корунда: $T = 900^\circ\text{C}$, $\omega = 0,2$ м/сек. 1 — CH₄; 2 — H₂; 3 — CO; 4 — $\alpha = 0,125$; 5 — $\alpha = 0,176$.

достаточном удалении от места ввода смеси характеризуется высокими содержаниями CO и H₂. На рисунке видно, что содержание CO по высоте реторты практически не меняется, концентрация водорода возрастает в результате термического разложения метана. По мере выгорания углерода содержание CO и H₂ понижается.

Поступила в редакцию
12/VIII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Мухленов, В. М. Тесленко, Б. Н. Шекун. ЖПХ, 1966, 1.
2. Г. К. Рубцов, Н. И. Сыромятников. Изв. вузов, Черная металлургия, 1964, 3.
3. А. А. Шмыков, И. И. Маергойз. Электротермия, 1963, 9.
4. А. П. Баскаков. Скоростной безокислительный нагрев и термическая обработка в кипящем слое. Металлургия, 1968.

УДК 532.507+536.46

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ

С. К. Асланов
(Одесса)

Исследование устойчивости зоны турбулентного горения относительно пересекающих ее слабых ударных волн впервые выполнено К. И. Щелкиным [1]. Приращение перепада давления в ударной волне за счет ускорения турбулентного пламени находится из представления зоны горения как растянутого скачка разрежения. Выражение для изменения скорости турбулентного сгорания под влиянием пересекающей пламя ударной волны (обратная связь) определяется из анализа взаимодействия этой волны с внутренней структурой турбулентного пламени (дисперсия, дифракция и распад ударной волны на очагах горения и т. д.). Из указанных соображений получен следующий критерий неустойчивости турбулентного горения:

$$B \frac{l}{L_k} \left(\frac{v'}{u_n} \right)^m (\kappa - 1) \frac{Q}{c_1^2} \frac{c_1 c_2}{(c_1 + c_2)^2} > 1 \quad \left(\frac{1}{2} \leq m \leq 1 \right), \quad (1)$$

где u_n — нормальная скорость пламени; v' — средняя скорость турбулентных пульсаций; l — масштаб турбулентности; L_k — длина камеры сгорания; κ — отношение теплоемкостей, принимаемое одинаковым в исходной смеси и продуктах сгорания; c_1, c_2 — скорости звука соответственно в исходной смеси и продуктах сгорания; Q — тепловой эффект реакции горения на единицу массы горючей смеси; B — постоянная, несильно отличающаяся от единицы и подлежащая определению из опыта.

В работе [2] была сделана попытка аналитического рассмотрения задачи газодинамической устойчивости зоны турбулентного горения относительно малых возмущений, которые накладывались на основное осредненное стационарное течение. Сопрягая возмущенные состояния областей исходной смеси, пламени и продуктов сгорания с помощью классических теорем об изменении массы, импульса и энергии, а также выведенного уравнения обратной связи (для взаимодействия акустических волн с внутренней турбулентной структурой пламени), удалось получить критерий неустойчивости, обеспечивающий экспоненциальное нарастание возмущений во времени и имеющий в случае небольших M_1, M_2 следующий вид:

$$B \frac{l}{L_k} \left(\frac{v'}{u_n} \right)^m (\alpha - 1) \frac{1 - M_1 / M_2}{M_1 / M_2 + 1} > 1; \quad \alpha = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (2)$$