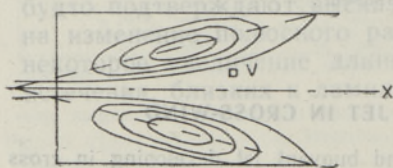


В. ПРЕСС

О МАССОПЕРЕНОСЕ ГАЗОВ В ОГРАНИЧЕННОМ ФАКЕЛЕ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА

В различных огнетехнических установках горение пылевидного топлива в начальных стадиях протекает обычно в условиях струйного течения аэровзвеси пыли, т. е. в неоднородном потоке частиц топлива и газов. В результате соприкосновения расширяющейся струи со стенками камеры в топочном пространстве возникают вихревые циркуляционные зоны между первоначальной массой струи и внешними ограждениями топки. По существу, в ограниченном факеле имеет место непрерывное турбулентное перемешивание рециркулирующих газов и аэросмеси топлива, что создает благоприятные условия для зажигания топлива. Это отражается и в изменении концентрации кислорода в зоне смешения факела. Пока мы еще не располагаем достаточными данными о поперечном переносе окислителя в факеле. Для исследования последнего ниже предлагается метод, который позволяет на основе экспериментальных данных по газообразованию и выгоранию делать суждения о количественном характере такого переноса, а также о рециркуляции топочных газов в факеле пылевидного топлива.



Ограниченная струя (факел) с циркуляционной зоной.

Рассмотрим процесс горения в произвольной точке V (элементарном объеме) в зоне смешения ограниченного факела. Горение топлива в любой точке факела характеризуется истинным коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{ист}$, который выражает степень расходования окислителя

$$\alpha_{ист} = \alpha_0 / \eta. \quad (1)$$

С другой стороны, $\alpha_{ист}$ можно вывести на основе материального баланса продуктов сгорания и окислителя с учетом элементарного состава топлива. Соответствующая наиболее обобщенная формула дана Г. Ф. Кнорре [1]

$$\alpha_{ист}^r = (\varepsilon \cdot 8C_T / 3 + 8H_T - O_T) / (8C_T / 3 + 8H_T - O_T). \quad (2)$$

Если процесс горения протекает при постоянном количестве воздуха в заранее перемешанном потоке горючей смеси, то в случае пренебрежения поперечной диффузией газов величины $\alpha_{ист}$ и $\alpha_{ист}^r$ должны совпадать. Следовательно, отношение $\alpha_{ист} / \alpha_{ист}^r$ характеризует поперечный

перенос окислителя в факеле в процессе газификации и выгорания топлива. При этом целесообразно рассматривать развитие горения в пространстве как результат сложения в объеме факела квазистатических последовательных процессов с конечным содержанием продуктов сгорания. Тогда для каждого элементарного объема можно написать [2]

$$Q_{\text{ов}}^{\text{эл}} / (Q_{\text{ов}}^{\text{эл}} + \Delta Q_{\text{в}}^{\text{эл}}) = a_{\text{ист}}^{\text{г}} / a_{\text{ист}}^{\text{г}}, \quad (3)$$

или

$$\Delta Q_{\text{в}}^{\text{эл}} / Q_{\text{ов}}^{\text{эл}} = (a_{\text{ист}}^{\text{г}^1} - a_{\text{ист}}^{\text{г}}) / a_{\text{ист}}^{\text{г}}. \quad (3a)$$

Однако в условиях горения топлива в закрытой камере при конечном α_0 содержание кислорода в единице объема подсасываемых газов отличается от содержания кислорода в воздухе. Поэтому оказывается необходимым ввести в формулу (3) вместо секундных количеств воздуха весовые концентрации кислорода, используя стехиометрическое уравнение. Из этого уравнения в одномерном факеле локальная относительная концентрация кислорода выражается формулой

$$c_{\text{O}_2}^x / c_{\text{O}_2} = 1 - \eta / \alpha_0. \quad (4)$$

При наличии поперечного переноса кислорода в факеле его локальная концентрация должна отличаться на величину Δc_{O_2} , стехиометрическое уравнение тогда выражается в виде

$$(c_{\text{O}_2}^x + \Delta c_{\text{O}_2}) / c_{\text{O}_2} = 1 - (\eta - \Delta \eta) / \alpha_0. \quad (5)$$

Вычитая (4) из (5), получаем

$$\Delta c_{\text{O}_2} / c_{\text{O}_2} = \Delta \eta / \alpha_0. \quad (6)$$

Поскольку $\Delta \eta = \alpha_0 / a_{\text{ист}}^{\text{г}} - \alpha_0 / a_{\text{ист}}^{\text{г}}$, то

$$\Delta c_{\text{O}_2} / c_{\text{O}_2} = (a_{\text{ист}}^{\text{г}^1} - a_{\text{ист}}^{\text{г}}) / a_{\text{ист}}^{\text{г}} a_{\text{ист}}^{\text{г}}. \quad (7)$$

По экспериментальным данным [3] химический состав газов в зоне обратных токов остается практически постоянным и соответствует либо полному выгоранию топлива при $\alpha_0 \geq 1,0$, либо полному израсходованию кислорода при $\alpha_0 < 1,0$. Таким образом, при избытке воздуха горения концентрацию кислорода в рециркулирующих газах можно определить по коэффициенту $a_{\text{ист}}^{\text{рец}}$, который соответствует среднему составу продуктов сгорания в рециркуляционной зоне

$$c_{\text{O}_2}^{\text{рец}} = c_{\text{O}_2} (1 - 1/a_{\text{ист}}^{\text{рец}}). \quad (8)$$

Обозначим количество рециркулирующих газов, проникших в элементарной объем факела, через ΔG . Из баланса кислорода

$$Q_{\text{ов}}^{\text{эл}} c_{\text{O}_2}^x + \Delta G c_{\text{O}_2}^{\text{рец}} = (Q_{\text{ов}}^{\text{эл}} + \Delta G) (c_{\text{O}_2}^x + \Delta c_{\text{O}_2}),$$

откуда

$$\Delta G = (-Q_{\text{ов}}^{\text{эл}}) \Delta c_{\text{O}_2} / (c_{\text{O}_2}^x + \Delta c_{\text{O}_2} - c_{\text{O}_2}^{\text{рец}}). \quad (9)$$

В начале процесса горения в ядре факела, возможно ввиду интенсивного выделения летучих компонентов, преобладающей является газификация топлива. В таком случае $\Delta c_{\text{O}_2} < 0$ и баланс кислорода в соответствующей зоне

$$Q_{\text{ов}}^{\text{эл}} c_{\text{O}_2}^x = (Q_{\text{ов}}^{\text{эл}} + \Delta G) (c_{\text{O}_2}^x + \Delta c_{\text{O}_2}),$$

откуда количество продуктов газификации в элементарном объеме факела

$$\Delta G = (-Q_{\text{ов}}^{\text{эл}}) \Delta c_{\text{O}_2} / (c_{\text{O}_2}^x + \Delta c_{\text{O}_2}). \quad (10)$$

Однако газификация в данном объеме может быть только кажущейся вследствие проникновения из смежных объемов газовых продуктов сгорания. В частности, когда $a_0 < a_{\text{ист}}^{\text{r}} < a_{\text{ист}}$, т. е. $c_{\text{O}_2}^x > -\Delta c_{\text{O}_2}$ и выгорание топлива характеризуется более интенсивным образованием продуктов сгорания, чем следовало бы ожидать из стехиометрического уравнения, то это можно объяснить также и смешением газов внутри зоны, где $\Delta c_{\text{O}_2} < 0$. При развитой газификации $a_{\text{ист}}^{\text{r}} < a_0$ и топливо как бы обогащается в результате насыщения газов продуктами неполного сгорания. Совместно газификация и выгорание топлива возможны в области $1 < a_{\text{ист}}^{\text{r}} < a_0$ за счет избыточного воздуха горения в аэросмеси. Далее, при более глубоком развитии газификации, когда $a_{\text{ист}}^{\text{r}} < 1 < a_0$ или $a_{\text{ист}}^{\text{r}} < a_0 < 1$ ($c_{\text{O}_2}^x < -\Delta c_{\text{O}_2}$) выгорание в элементарном объеме уже не может происходить из-за отсутствия окислителя, поэтому здесь мы имеем дело только с пиролизом топлива. В точке же $a_{\text{ист}}^{\text{r}} = 1$ ($c_{\text{O}_2}^x = -\Delta c_{\text{O}_2}$) уравнение (10) претерпевает разрыв и значения ΔG становятся отрицательными. Последнее означает, что в соответствующем элементарном объеме не наблюдается притока газов снаружи (из кислородной зоны факела), а имеет место увеличение массы газов внутри объема исключительно за счет процесса газификации топлива.

Таким образом, условно принимая за зону газификации в факеле область $\Delta c_{\text{O}_2} < 0$, можно разбить ее на 1) участок газификации с частичным выгоранием топлива ($c_{\text{O}_2}^x + \Delta c_{\text{O}_2} > 0$) и 2) участок чистой газификации топлива ($c_{\text{O}_2}^x + \Delta c_{\text{O}_2} < 0$). При этом в расчетах суммирование массы возникших газов на обоих участках следует проводить по абсолютным значениям $|\Delta G|$.

В действительности нам приходится считаться и с возможными притоками воздуха в зону рециркуляции газов через наружные ограждения топочного пространства, в результате чего концентрация кислорода в факеле увеличивается. Из формул (3а) и (7) видно, что в элементарном объеме факела относительный прирост концентрации кислорода связан с относительным приростом секундного количества воздуха следующим соотношением:

$$\Delta c_{\text{O}_2} / c_{\text{O}_2} = \Delta Q_{\text{в}}^{\text{эл}} / Q_{\text{ов}}^{\text{эл}} a_{\text{ист}}^{\text{r}}. \quad (11)$$

Увеличивается также общее количество рециркулирующих газов в факеле. Вместе с тем, концентрация кислорода в рециркулирующих газах приобретает значение

$$c_{\text{O}_2}^{\text{рец}^*} = (\Delta G c_{\text{O}_2}^{\text{рец}} + \Delta Q_{\text{в}}^{\text{эл}} c_{\text{O}_2}) / (\Delta G + \Delta Q_{\text{в}}^{\text{эл}}).$$

Нетрудно убедиться, что в этом случае соотношение (9) принимает вид

$$\Delta G^* = (-Q_{\text{ов}}^{\text{эл}}) \Delta c_{\text{O}_2} / (c_{\text{O}_2}^x + \Delta c_{\text{O}_2} - c_{\text{O}_2}^{\text{рец}^*}), \quad (12)$$

причем $\Delta G^* = \Delta G + \Delta Q_{\text{в}}^{\text{эл}}$.

Сумма элементарных приростов ΔG^* по поперечному сечению факела определяет интенсивность проникновения газов в это сечение. Включая сюда и массу газов $\Delta \Gamma$, возникших в ходе газификации топлива, получим общий прирост количества протекающих газов для данного сечения факела

$$\Delta(G^* + \Gamma)_F = \int_F (\Delta G^* + |\Delta \Gamma|) dF. \quad (13)$$

Общее количество избыточных газов в прямоочной части факела определяется как интегральная сумма прироста $(G^* + \Gamma)_F$ по длине факела

$$(G^* + \Gamma)_x = \int_0^x \Delta(G^* + \Gamma) dx. \quad (14)$$

По максимальному значению последнего интеграла можно вычислить кажущийся коэффициент рециркуляции газов в горящем факеле

$$K_D = [Q_{ов} + (G^* + \Gamma)_x^{макс}] / Q_{ов}. \quad (15)$$

Координата x , которой соответствует максимальное значение $G^* + \Gamma$, определяет местонахождение сечения факела, в котором располагается ось контура рециркуляции.

Обозначения

- | | |
|---|--|
| α_3 — итоговый (балансовый) коэффициент избытка воздуха в аэросмеси топлива; | объем факела в результате смешения газов, $м^3/м^3 \cdot сек$; |
| $\alpha_{ист}$ — истинный коэффициент избытка воздуха, определенный по выгоранию топливной пыли; | $c_{O_2}, c_{O_2}^*$ — весовые концентрации кислорода в воздухе и в одномерном факеле при нормальных условиях, $кг/м^3$; |
| $\alpha_{ист}^\Gamma$ — истинный коэффициент избытка воздуха, определенный по химическому составу газов в факеле; | Δc_{O_2} — разность действительной концентрации кислорода по сравнению с концентрацией в случае одномерного выгорания топливной пыли, $кг/м^3$; |
| η — степень выгорания топлива; | $c_{O_2}^{рек}$ — средняя концентрация кислорода в рециркулирующих газах, $кг/м^3$; |
| C_T, H_T, O_T — содержание элементарного углерода, водорода и кислорода в топливе, %; | ΔG — секундное количество рециркулирующих газов, проникших в элементарный объем факела, $м^3/м^3 \cdot сек$; |
| ϵ — коэффициент, зависящий от химического состава газов; | $\Delta \Gamma$ — количество газифицированного топлива в элементарном объеме факела, $м^3/м^3 \cdot сек$; |
| $Q_{ов}^{эл}$ — первоначальное секундное количество воздуха (окислителя) в элементарном объеме факела, усредненное по поперечному сечению прямого потока газов, $м^3/м^3 \cdot сек$; | ΔG^* — действительное количество рециркулирующих газов, $м^3/м^3 \cdot сек$. |
| $\Delta Q_V^{эл}$ — количество воздуха, подсаваемого в элементарный | |

ЛИТЕРАТУРА

1. Кнорре Г. Ф., Тепловые расчеты по газовому анализу, М., 1947.
2. Пресс В., Отс А., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 17, 458 (1963).
3. Миткалинный В. И., В сб.: Процессы в пламени промышленных печей, М., 1969, с. 65.

*Институт термодинамики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
5/VII 1972

V. PRESS

GAASIDE MASSIÜLEKANDEST SULETUD TOLMKÜTUSE LEEGIS

Artiklis vaadeldakse hapendaja ja põlemisaaduste ristisuunalist massivahetust tolmkütese leegis juhul, kui kolderuumis toimub gaaside tsirkulatsioon. Kütese põlemise ja hapnikukulu diferentsiaalbilansi alusel esitatakse meetod, mis võimaldab arvutada retsirkuleerivate koldegaaside hulka, lähtudes põlemisprotsessi karakteristikatest.

V. PRESS

ON THE MASS TRANSFER OF GASES IN CONFINED FLAMES OF PULVERIZED FUEL

In the paper the transverse mass transfer of oxidant and combustion products in pulverized fuel flame is considered, when the gas circulation takes place in furnace volume. On the grounds of differential balance between the fuel burnout and the oxidant consumption, a method is proposed which enables to calculate the quantity of recirculating furnace gases, proceeding from the characteristics of the combustion process.