

О ВЫВОДЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ СОСТАВОМ ТОПЛИВА И СОСТАВОМ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

В. Н. СМИРЕНСКИЙ

Уравнение, связывающее состав топлива с составом конечных продуктов сгорания, имеет существенное значение для анализа процессов горения. Во всей имеющейся по данному вопросу литературе эта математическая зависимость получается как бы косвенным путем при постановке вопроса об определении характеристики топлива или о подсчете окиси углерода в продуктах сгорания. Сам вывод производится следующим образом. За исходное уравнение берут выражение для суммы сухих газов в процентах или в объемных единицах. Затем путем большого количества всяких подстановок и преобразований приходят к тому или иному конечному выражению. Попутно получается зависимость между составом топлива и составом продуктов горения. У изучающих данный вопрос создается впечатление, что физического смысла в данном уравнении нет, а получается оно путем применения целого ряда искусственных преобразований. В ходе всего длинного и сложного вывода нет логической ясности, сам он становится малопонятным, трудным для изложения и усвоения.

Представляется более целесообразным с самого начала ставить задачу о нахождении связи между исходным составом топлива и составом конечных продуктов горения. Выражения для характеристики топлива или для определения окиси углерода получаются или в процессе вывода или вытекают из основного уравнения. Из этого основного выражения может быть получен и целый ряд других существенных зависимостей.

В данной работе приводится более целесообразная методика вывода интересующего нас выражения для твердых и жидких топлив. В первом разделе дается подробный вывод уравнения при наличии химической неполноты горения в виде окиси углерода. Во втором разделе приводятся результаты вывода полного уравнения с учетом прочих возможных элементов химической неполноты горения топлива. Уравнение в полном виде может иметь существенное значение для анализа газогенераторных процессов.

I. НЕПОЛНОЕ ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА С ОБРАЗОВАНИЕМ ОКИСИ УГЛЕРОДА

Известно, что горение отдельных горючих элементов, входящих в состав топлива, сопровождается изменениями объемов. Эти изменения объемов различны для разных горючих элементов и, кроме того, различны при разных реакциях горения (полное или неполное горение).

При горении 1 кг топлива определенного состава также произойдет изменение объема, причем величина этого изменения будет зависеть от того, какие элементы входили в состав топлива, в каком количестве и как протекали реакции горения. Полученный в результате горения топлива объем газов будет иметь и вполне определенный состав. При таком положении имеется, очевидно, возможность найти связь между составом топлива

и составом конечных продуктов горения. Эту связь можно установить через изменение объемов.

В разбираемом нами случае горения твердого топлива будут иметь место изменения объемов: 1) от полного сгорания углерода в CO_2 (Δv_1), 2) от неполного горения углерода в CO (Δv_2), от горения серы в SO_2 (Δv_3), от горения „свободного“ водорода в H_2O (Δv_4) и, как условно принимают, от газификации азота топлива в N_2 (Δv_5). Если взять для рассмотрения объем сухих газов, полученных после горения 1 кг топлива — V_{c2} нм³/кг, и объем подведенного воздуха — $V_в$ нм³/кг, то для получения интересующей нас зависимости будем иметь следующее исходное выражение:

$$V_{c2} = V_в + \sum_1^5 \Delta v \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (1)$$

Необходимо найти все изменения объемов при горении отдельных элементов топлива $\sum_1^5 \Delta v$, выразить V_{c2} , $V_в$ и $\sum_1^5 \Delta v$ через состав топлива и состав сухих газов и подставить их значения в уравнение (1). После соответствующих преобразований получим выражение, связывающее состав топлива с составом продуктов горения.

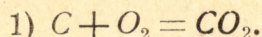
Примем следующие обозначения и величины: $K^p = C^p + 0,368 S^p$, C^p , H^p , S^p , O^p , $N^{p0}/100$ — процентное значение элементов сгоревшего топлива $RO_2 = CO_2 + SO_2$, CO , O_2 , $N_2^{0}/100$ — процентный состав сухих газов;

V_{co} , V_{co2} , V_{so2} нм³/кг — объемы соответствующих газов;

$V_{O_2}^{co2}$, $V_{O_2}^{co}$, $V_{O_2}^{so2}$ нм³/кг — объемы кислорода, пошедшего на образование соответствующего газа.

Молекулярные объемы: для O_2 — 22,39, для CO — 22,4, для CO_2 — 22,26, для SO_2 — 21,89 нм³/моль. Молекулярный вес для H_2 — 2,016 кг/моль. Удельные веса: для SO_2 — 2,926, для N_2 — 1,251 кг/нм³.

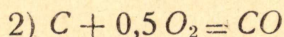
Найдем все изменения объемов от отдельных элементов, входящих в состав 1 кг сжигаемого топлива.



Ввиду неравенства молекулярных объемов кислорода и углекислоты при этой реакции получим изменение объема газов на величину:

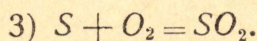
$$\begin{aligned} \Delta v_1 &= V_{co2} - V_{O_2}^{co2} = \frac{CO_2}{100} V_{c2} - \frac{22,39}{22,26} \frac{CO_2}{100} V_{c2} = \\ &= -0,006 \frac{CO_2}{100} V_{c2} \text{ нм}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Знак минус показывает уменьшение объема.



Ввиду незначительной разницы в молекулярных объемах для CO и O_2 можно написать, что

$$\Delta v_2 = V_{co} - V_{O_2}^{co} = (1 - 0,5) \frac{CO}{100} V_{c2} = +0,5 \frac{CO}{100} V_{c2} \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}}.$$



В данном случае получим уменьшение объема на величину:

$$\Delta v_3 = V_{SO_2} - V_{O_2}^{SO_2} = \left(1 - \frac{23,39}{21,89}\right) \frac{SO_2}{100} V_{c2} = -0,023 \frac{SO_2}{100} V_{c2} \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}}.$$

Для возможности объединения Δv_1 и Δv_3 разобьем Δv_3 на 2 слагаемых:

$$\Delta v_3 = -0,006 \frac{SO_2}{100} V_{c2} - 0,017 \frac{SO_2}{100} V_{c2}.$$

Первый член объединим с Δv_1 и получим $-0,006 \frac{RO_2}{100} V_{c2} \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}}$. Во втором члене исключим SO_2 , для чего поступаем следующим образом. Так как в 1 нм³ SO_2 содержится серы 1,47 кг/нм³, то можно записать:

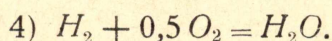
$$V_{SO_2} = \frac{S^p_{\text{л}}}{100 \cdot 1,47} \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{c2}} 100 = \frac{S^p_{\text{л}}}{1,47 \cdot V_{c2}} \text{ \%}.$$

$$-0,017 \frac{SO_2}{100} V_{c2} = -0,0115 \frac{S^p_{\text{л}}}{100}.$$

Таким образом:

$$\Delta v_1 + \Delta v_3 = -0,006 \frac{RO_2}{100} V_{c2} - 0,0115 \frac{S^p_{\text{л}}}{100} \text{ нм}^3/\text{кг}.$$



По отношению к объему сухих газов здесь получится уменьшение объема на величину кислорода, пошедшего на горение „свободного“ водорода $H^p - 0,126 O^{p0}/0$.

$$\Delta v_4 = -0,5 \cdot 22,39 \frac{H^p - 0,126 O^p}{100 \cdot 2,016} = -5,55 \frac{H^p - 0,126 O^p}{100} \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

5) Приняв, что азот топлива перейдет в дымовые газы, получим увеличение объема на величину:

$$\Delta v_5 = + \frac{N^p}{100 \cdot 1,251} = +0,8 \frac{N^p}{100} \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

После подстановки всех значений Δv ,

$$\begin{aligned} V_g &= \frac{\frac{N_2}{100} V_{c2} - 0,8 \frac{N^p}{100}}{79} 100 = \\ &= V_{c2} \frac{100 - (RO_2 + O_2 + CO)}{79} - \frac{0,8 N^p}{79} \text{ нм}^3/\text{кг} \end{aligned}$$

и

$$V_{c2} = \frac{K^p}{0,539 (RO_2 + CO)} \text{ нм}^3/\text{кг}$$

в уравнение (1) и соответствующих преобразований получим:

$$21 - 1,005 RO_2 - O_2 - 0,605 CO = \\ = \frac{2,37 (H^p - 0,126 O^p) + 0,09 N^p + 0,005 S^p_{\text{л}}}{K^p} (RO_2 + CO).$$

Приняв

$$\beta = \frac{2,37 (H^p - 0,126 O^p) + 0,09 N^p + 0,005 S^p_{\text{л}}}{K^p} + 0,005, \quad (2)$$

получим искомое уравнение в окончательном виде:

$$21 - \beta RO_2 - (RO_2 + O_2) - (0,6 + \beta) CO = 0 \quad (3)$$

Величина β , зависящая исключительно от состава горючей массы топлива, носит название „характеристики топлива“. При небольшом содержании азота и серы в твердых и жидких топливах формулу (2) часто упрощают и дают в следующем виде:

$$\beta = 2,37 \frac{H^p - 0,126 O^p}{K^p} + 0,005.$$

Обычно характеристике топлива β не придают никакого физического смысла, однако здесь можно отметить следующее. Известно, что с увеличением химического возраста ископаемого топлива значительно повышается процентное содержание основной составляющей его горючей массы — углерода — за счет одновременного уменьшения водорода и кислорода. Следовательно, с увеличением химического возраста ископаемого топлива значение величины β должно непрерывно уменьшаться, так как знаменатель выражения будет расти, а числитель оставаться примерно постоянным. Таким образом, следует признать, что величина β характеризует собой химическую зрелость ископаемого топлива данного месторождения.

Примечание: Если пренебречь неравенством молекулярных объемов газов, то вывод выражения (3) значительно упрощается.

II. НЕПОЛНОЕ ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА С ОБРАЗОВАНИЕМ CO , H_2 , C_mH_n и H_2S

Для упрощения вывода можно принять, что водород и все соединения углеводородов в газах являются частными случаями общего углеводорода C_mH_n .

Пользуясь той же методикой вывода, необходимо учесть, что часть водорода топлива в этом случае пойдет на образование C_mH_n и H_2S и часть серы пойдет на образование H_2S . Поэтому будем иметь:

$$\Delta v_3 = -0,006 \frac{SO_2}{100} V_{c2} - 0,012 \frac{S^p_{\text{л}}}{100} + 0,017 \frac{H_2S}{100} V_{c2} \text{ нм}^3/\text{кг},$$

$$\Delta v_4 = -5,55 \frac{H^p - 0,126 O^p}{100} + 0,5 \frac{H_2S + 0,5n C_mH_n}{100} V_{c2} \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Добавится новый член

$$\Delta v_6 = + \frac{H_2S + C_mH_n}{100} V_{c2} \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Δv_1 , Δv_2 и Δv_5 останутся без изменений.

Выражения для объема воздуха и газов:

$$V_g = V_{cz} \frac{100 - (RO_2 + O_2 + CO + C_m H_n + H_2 S)}{79} - \frac{0,8 N^p}{79} \text{ нм}^3/\text{кг},$$

$$V_{cz} = \frac{K^p}{0,539 (RO_2 + CO + m C_m H_n + 0,989 H_2 S)} \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (4)$$

Искомое выражение примет вид:

$$21 - \beta RO_2 - (RO_2 + O_2) - (0,6 + \beta) CO + [0,198 n - m (\beta - 0,005) - 0,21] C_m H_n + \\ + (0,2(6 - 0,989 \beta) H_2 S = 0. \quad (5)$$

Характеристика топлива β имеет то же значение, что и в уравнении (2).

Аналогичным путем выводятся соответствующие выражения и для случая сжигания газообразных топлив.

В общем случае химической неполноты горения газообразного топлива основное уравнение зависимости конечных продуктов сгорания от исходного топлива одинаково с уравнением (5).

Характеристика топлива в этом случае имеет вид:

$$\beta = \frac{21 - (RO_2^m + O_2^m) - 0,6 CO^m}{RO_2^m + CO^m + m C_m H_n^m + 0,989 H_2 S^m} + \\ + \frac{(0,198 n + 0,005 m - 0,21) C_m H_n^m + 0,206 H_2 S^m}{RO_2^m + CO^m + m C_m H_n^m + 0,989 H_2 S^m}, \quad (6)$$

где $RO_2^m = CO_2^m + SO_2^m$, CO^m и т. д. — процентный состав газообразного топлива. Под $C_m H_n^m$ по-прежнему подразумеваются все углеводороды топлива и водород.