

**НОВЫЕ МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ ПРЯМЫХ ТЕПЛОВЫХ
БАЛАНСОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ КОТЛОАГРЕГАТОВ**

В. Н. СМИРЕНСКИЙ

Для балансовых испытаний котлоагрегатов, работающих на твердом топливе, самыми трудными и малонадежными операциями являются отбор средних проб очаговых остатков и определение их количеств. Шлак бывает очень неоднородным, а при зольном топливе его накапливается за опыт большое количество. Поэтому правильный отбор средней пробы шлака весьма затруднен.

Что касается отбора средней пробы уноса, то протарировать газоход в месте отбора пробы не представляется возможным ни по фракционному составу ни по процессу его выгорания, особенно если иметь в виду изменения в режиме работы топки во время испытания. Качественное состояние уноса может сильно отличаться по сечению газохода. Это поведет к тому, что отобранная проба не будет представлять среднюю пробу уноса. В результате потеря от механического недожога, подсчитанная по данным испытания, может сильно отличаться от истинной. Вместе с этим получают неправильные значения объем сухих газов, определяемый через эту потерю, а также потери от химической неполноты сгорания и с уходящими газами. В итоге—тепловой баланс не сводится.

Неправильные значения отдельных потерь рельефнее всего выявляются при обработке материалов серий опытов, проведенных для выяснения каких-либо закономерностей в режиме работы топки и котлоагрегата.

В отношении потери от механического недожога следует сделать еще одно замечание. Из двух методов отнесения этой потери за счет недожога углерода или за счет пропорционального недогорания всех горючих элементов топлива наиболее правильным является первый. Процесс образования несгоревших горючих в очаговых остатках, происходящий при сильно затрудненном доступе кислорода воздуха к ядру горячей частицы, подобен процессу коксования. Сравнение же состава кокса с составом исходного топлива говорит о том, что в коксе остается почти весь углерод топлива. Лишь 4—5% его переходит в коксовый газ. Что касается водорода и кислорода, то основная их часть, до 70% и больше, переходит в газообразное состояние. Таким образом, принципиально будет более правильно считать, что горючие очаговых остатков состоят в основном из углерода.

Дальше рассматриваются два возможных случая работы топочных устройств испытываемых котлоагрегатов: для самого общего случая

химической неполноты горения и для случая, когда химическая неполнота горения происходит в основном за счет СО. Для первого случая приведено выражение, позволяющее сразу определить объем сухих газов, а для второго — сгоревший углерод. И в том и в другом случаях определение этих величин сразу решает вопрос о сведении всего теплового баланса.

Испытания с прямым сведением теплового баланса проводятся на всех котлоагрегатах малой мощности и многих котлоагрегатах средней мощности.

1. Общий случай химической неполноты горения

Рассмотрим самый общий случай химической неполноты горения. В таких случаях, естественно, необходим полный газовый анализ. Такого рода испытания могут проводиться при исследовании работы новых конструкций котлоагрегатов или топочных устройств, при переходе на новые, отличные по своим свойствам, топлива и в других случаях, когда химическая неполнота горения может быть значительной и состоять из разных элементов.

При испытаниях котлоагрегатов с прямым сведением теплового баланса использованное тепло определяется достаточно надежно через непосредственные замеры. Потеря тепла во внешнюю среду всегда мала и не представляет обычно интереса потому, что существенно воздействовать на величину этой потери не представляется возможным. Для испытуемого котлоагрегата можно взять величину этой потери с достаточной точностью по справочным данным. Таким образом, интерес могут представлять три основные потери: с уходящими газами, от химической и механической неполноты горения. Все эти потери могут быть выражены через объем сухих газов.

1) Потеря тепла с уходящими газами

$$Q_2 = (c_{\text{ср}} V_{\text{ср}} + c_{\text{вп}} V_{\text{вп}}) \vartheta_{\text{yx}} - \left[V_{\text{ср}} + \frac{N^p - 0,126O^p - N_{2\text{аз}}^p}{100} \frac{7,94}{1,429} - \frac{0,8N^p}{100} - \frac{N_2 + \text{CH}_4 + C_m H_n}{100} V_{\text{ср}} \right] (ct)_{\text{хв}} \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}. \quad (1)$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой действительное количество воздуха, приходящееся на килограмм сгоревшего топлива, для последнего газохода за установкой $\alpha_{\text{yx}} V_1^0$; второе слагаемое в квадратных скобках представляет кислород воздуха, затраченный на окисление полностью сгоревшего водорода; третье слагаемое — азот топлива, условно принятый перешедшим в газообразное состояние, четвертое — увеличение объема сухих газов против объема воздуха за счет химического недожога N_2 , CH_4 и $C_m H_n$.

Количество водорода, не сгоревшего в H_2O и перешедшего в сухие газы,

$$N_{2\text{аз}}^p = 0,09 \left(N_2 + 2\text{CH}_4 + \frac{n}{2} C_m H_n \right) V_{\text{ср}}^0. \quad (2)$$

Объем водяных паров

$$V_{\text{вн}}^1 = 0,111(N^p - N_{\text{зас}}^p) + 0,0124 W^p + 0,0161\alpha_{\text{yx}} V^0 \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}}. \quad (3)$$

В данном выражении теоретическое количество воздуха для сгоревшего топлива V_1^0 заменено теоретическим количеством воздуха для рабочего топлива V^0 . Это вполне допустимо ввиду ничтожно малого влияния этой замены на результат.

После подстановки в выражение (1) соответствующих значений из (2) и (3) и некоторых преобразований получим

$$Q_2 = [c_{\text{ст}} \vartheta_{\text{yx}} - A(c_{\text{вн}} \vartheta_{\text{yx}} - 0,5 c_{\text{хв}} t_{\text{хв}}) - P(ct)_{\text{хв}}] V_{\text{ст}} + \\ + c_{\text{вн}} V_{\text{вн}} \vartheta_{\text{yx}} - f(ct)_{\text{хв}} \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}, \quad (4)$$

где

$$A = \frac{\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + \frac{n}{2} \text{C}_m\text{H}_n}{100},$$

$$P = 1 - \frac{\text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{C}_m\text{H}_n}{100},$$

$$V_{\text{вн}} = 0,111N^p + 0,0124 W^p + 0,0161\alpha_{\text{yx}} V^0 \quad \text{и}$$

$$f = \frac{5,55N^p - 0,7O^p - 0,8N^p}{100}.$$

2) Потеря от химической неполноты горения

$$Q_3 = \left(30,2\text{CO} + 25,8\text{H}_2 + 85,5\text{CH}_4 + \text{C}_m\text{H}_n \frac{Q_{\text{сг}}}{100} \right) V_{\text{ст}} \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}. \quad (5)$$

3) Потеря от механического недожога

$$Q_4 = 81 (K^p - K_1^p) \frac{\text{ккал}}{\text{кг}},$$

где K^p и K_1^p — условные количества углерода в рабочем топливе и действительно сгоревшего, %.

Имея в виду, что

$$V_{\text{ст}} = \frac{1,86 K_1^p}{(\text{RO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + m\text{C}_m\text{H}_n)} \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}},$$

откуда

$$K_1^p = 0,536 (\text{RO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + m\text{C}_m\text{H}_n) V_{\text{ст}} \%, \quad (6)$$

получим

$$Q_4 = 81 K^p - 43,5 (\text{RO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + m\text{C}_m\text{H}_n) V_{\text{ст}} \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}. \quad (7)$$

Если объем сухих газов, необходимый для сведения теплового баланса, не может быть определен через непосредственные замеры во время опыта, то он может быть найден косвенным путем.

Так как

$$Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_n \left(1 - \frac{q_1 + q_5}{100} \right), \quad (8)$$

то, подставляя сюда значения потерь из (4), (5) и (7), определяя из полученного равенства объем сухих газов и делая некоторые возможные упрощения, получим в окончательном виде

$$V_{\text{сг}} = \frac{81 K^p - Q_n \left(1 - \frac{q_1 + q_5}{100} \right) + c_{\text{вп}} V_{\text{вп}} \vartheta_{\text{yx}}}{43,5 \text{RO}_2 + c_{\text{сг}} \vartheta_{\text{yx}} + P (ct)_{\text{XB}} + 13,3 \text{CO} + 25,8 \text{H}_2 + 42 \text{CH}_4 + c_{\text{вп}} V_{\text{вп}} \vartheta_{\text{yx}}} \frac{\text{н.м}^3}{\text{кг}} \quad (9)$$

Упрощения, принятые в данном выражении, следующие: в числителе опущен член $f(ct)_{\text{XB}}$, а в знаменателе $+ A (c_{\text{вп}} \vartheta_{\text{yx}} - 0,5 c_{\text{XB}} t_{\text{XB}})$, так как это не может оказать никакого влияния на конечный результат.

Если химическая неполнота горения происходит только за счет CO, то

$$V_{\text{сг}} = \frac{81 K^p - Q_n \left(1 - \frac{q_1 + q_5}{100} \right) + c_{\text{вп}} V_{\text{вп}} \vartheta_{\text{yx}}}{43,5 \text{RO}_2 + c_{\text{сг}} \vartheta_{\text{yx}} + (ct)_{\text{XB}} + 13,3 \text{CO}} \frac{\text{н.м}^3}{\text{кг}} \quad (10)$$

Как видно из (9) и (10), объем сухих газов определяется через большие величины. Это может оказать только положительное влияние на точность искомой величины.

В этих выражениях состав газов, объемы, теплоемкости и температура газов относятся к уходящим газам.

Забор газов на анализ и замер температур надежнее всего производить за дымососом, если последний расположен вблизи котлоагрегата. Если дымосос расположен настолько далеко, что газы могут значительно охладиться (не за счет присосов, а за счет теплоотдачи), то тогда замер температуры уходящих газов и отбор проб для их анализа следует организовать ближе к котлоагрегату, выбрав для этого такие точки замеров, где можно рассчитывать на достаточно хорошее перемешивание газов. Последнее нужно иметь в виду и в случае испытания установки с естественной тягой.

При значительной потере тепла с физическим теплом шлаков, например, при жидком шлакоудалении или при большой зольности топлива и слоевом сжигании, эта потеря может быть учтена в выражениях (9) и (10). Для этого второй член числителя следует писать так:

$$-Q_n \left(1 - \frac{q_1 + q_5 + q_6}{100} \right).$$

После определения объема сухих газов дальнейшие подсчеты по составлению теплового баланса не представляют никаких затруднений. Потеря Q_2 подсчитывается по обычной формуле или по одной из видоизмененных (1), (4). При подсчете Q_2 по общепринятой формуле

предварительно определяется K_1^p (6) и по известным формулам V_1^0 и α_{yx} . Потери Q_3 и Q_4 находятся по формулам (5) и (7). Этим и заканчивается составление теплового баланса.

Приведенный метод позволяет просто, быстро и достаточно точно составить полный тепловой баланс котлоагрегата для самого общего случая химической неполноты горения. Точность находимых балансовых величин, естественно, определяется точностью проводимых во время опыта наблюдений и замеров. Суммарная потеря от механической неполноты горения может быть определена без замеров количеств шлака, провала и уноса, без отбора средних проб и без анализа качества их. Это во многих случаях может сильно облегчить работу наблюдателей во время испытания. Если требуется определение отдельных слагающих потери от механического недожога, то следует организовать замеры по некоторым из них, наиболее надежным и удобным. Трудно поддающаяся определению составляющая механического недожога, например, потеря с уносом, может быть определена по разности.

II. Химическая неполнота горения происходит в основном за счет CO.

Такой случай встречается очень часто у работающих котлоагрегатов. Поэтому при рядовых эксплуатационных испытаниях нет надобности усложнять работу наблюдателей и лаборантов громоздким газовым анализом. Более того, желательно иметь метод, позволяющий при максимальном упрощении работ во время самого опыта достаточно просто и правильно свести полный тепловой баланс.

В этом случае оказывается более удобным использовать выражение для сгоревшего углерода, зная величину которого очень легко определить объем сухих газов, а затем и все основные потери. Величины Q_1 и Q_5 по-прежнему считаем известными.

Выражение для условного количества сгоревшего углерода K_1^p может быть найдено без данных о количестве и качестве очаговых остатков.

Имея в виду, что в данном случае химическая неполнота горения происходит за счет CO, запишем выражения для основных потерь аналогично тому, как это было в I случае.

$$1. \quad Q_2 = (c_{сг} V_{сг} + c_{вп} V_{вп}) \theta_{yx} \left[V_{сг} \left(\frac{H^p}{100} \frac{0,126 O^p 7,94}{1,429} + \frac{0,8 N^p}{100} \right) (ct)_{хв} + [c_{сг} \theta_{yx} + (ct)_{хв}] V_{сг} + c_{вп} V_{вп} \theta_{yx} - f (ct)_{хв} \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \right] \quad (11)$$

где

$$f = \frac{5,55 H^p - 0,7 O^p - 0,8 N^p}{100}$$

$$V_{вп} = 0,111 H^p + 0,0124 W^p + 0,0161 \alpha_{yx} V^0 \frac{\text{л.м}^3}{\text{кг}}$$

В выражении для $V_{вп}$ так же, как и в (3), вместо V_1^0 подставлено V^0 , так как практически это ничего не изменит.

$$2. \quad Q_3 = 30,2 \text{ CO } V_{сг} \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \quad (12)$$

$$3. \quad Q_4 = 81 (K^p - K_1^p) \frac{\kappa \kappa \alpha L}{\kappa \tau} \quad (13)$$

Подставляя в равенство (8) значения приведенных выше потерь (11), (12), (13), заменяя объем сухих газов $V_{\text{ст}}$, CO и характеристику сгоревшего топлива ξ_1 через их значения

$$V_{\text{ст}} = \frac{1,86 K_1^p}{\text{RO}_2 + \text{CO}} \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}} \quad (14)$$

$$\text{CO} = \frac{21 - \xi_1 \text{RO}_2 - (\text{RO}_2 + \text{O}_2) \alpha_0}{0,605 + \xi_1} \quad (15)$$

$$\xi_1 = 2,35 \frac{\text{H}^p - 0,126 \text{O}^p}{K_1^p} + 0,005 \quad (16)$$

и решая полученное уравнение относительно K_1^p , получим

$$K_1^p = \frac{(21 - 0,4 \text{RO}_2 - \text{O}_2) M - (2,35 L - 58,3 \text{RO}_2) (\text{H}^p - 0,126 \text{O}^p)}{520,8 + 0,605 L - 24,8 (\text{RO}_2 + \text{O}_2) - 0,124 \text{RO}_2} \% \quad (17)$$

Здесь

$$M = 81 K^p - c_{\text{вн}} V_{\text{вн}} \theta_{\text{ух}} - Q_{\text{н}}^p \left(1 - \frac{q_1 + q_5}{100} \right),$$

$$L = 81 \text{RO}_2 + 1,86 [c_{\text{ст}} \theta_{\text{ух}} - (ct)_{\text{хв}}].$$

В выражении для M опущен член $-f(ct)_{\text{хв}}$ ввиду ничтожно малого его влияния.

После определения K_1^p баланс сводится просто и быстро, так как ряд величин будет уже подсчитан.

Характеристики сгоревшего топлива ξ_1 , CO и $V_{\text{ст}}$ найдутся из выражений (16), (15), (14).

Количество несгоревшего углерода

$$C_{\text{нн}} = K^p - K_1^p \alpha_0.$$

Потеря Q_2 может быть определена по выражению (11). При расчете этой потери по обычной формуле сначала нужно найти теоретическое количество воздуха для сгоревшего топлива

$$V_1^0 = 0,0889 K_1^p + 0,265 \text{H}^p - 0,0333 \text{O}^p \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}}.$$

Потери Q_3 и Q_4 определяются по выражениям (12) и (13). Этим и заканчивается сведение теплового баланса.

Использование данного метода позволяет, как и в I случае, определить суммарную потерю от механической неполноты сгорания, минуя все операции, связанные с замером количеств и обработкой проб шлака провала и уноса. Анализ газов делается только на RO_2 и O_2 . Как известно, поглощение CO в газоанализаторе идет медленно и при малом содержании его в газах легко может быть допущена значительная ошибка. В данном случае химическая неполнота горения определяется без анализа газа на CO во время опыта. Таким образом, применение данного метода для сведения теплового баланса позволяет значительно упростить работы наблюдателей во время испытания, особенно в тех случаях, когда можно ограничиться величиной полной потери от механического недожога.