

## К ВОПРОСУ СРАВНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЛОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В. А. БРАГИН

В борьбе за экономию топлива на электрических станциях большое значение имеет уменьшение потерь тепла с уходящими дымовыми газами, температура которых все еще остается высокой. Уменьшение указанной потери достигается снижением температуры газов и сокращением приточного холодного воздуха в сушильно-мельничной системе и в самом котельном агрегате.

Для снижения температуры уходящих газов в последнее время предложен и внедрен в эксплуатацию целый ряд различных способов. Из них наиболее заманчивыми являются такие, как увеличение основных хвостовых поверхностей нагрева котла (экономайзера и воздухоподогревателя). В этом случае использованное тепло идет на увеличение выработки пара в котле. Установлено, что подобный путь снижения температуры уходящих газов является единственно правильным при сжигании сухих топлив.

Труднее снизить температуру уходящих газов при сжигании влажных и сернистых топлив. Как показывает практика, развитие основных хвостовых поверхностей нагрева здесь не дает желаемого эффекта, и температура уходящих газов держится порядка 160—200°С. Поэтому появились утилизационные поверхности нагрева, подогревающие воду или производящие пар для различных целей (экономайзеры низкого давления<sup>1</sup>), котлы-утилизаторы). Эти поверхности нагрева дают возможность значительно снизить температуру уходящих газов.

По методу использования тепла уходящих газов различают следующие основные схемы утилизации: 1) использование тепла уходящих газов для целей теплофикации или агротеплофикации; 2) использование тепла уходящих газов в тепловой схеме станции; 3) использование тепла уходящих газов в отопительный период для целей теплофикации или агротеплофикации, а летом—в системе регенерации турбин; 4) использование тепла уходящих газов для нужд бытового или производственного горячего водоснабжения; 5) использование тепла уходящих газов для предварительного подогрева воздуха в целях предотвращения коррозии воздухоподогревателя; 6) использование тепла уходящих газов для получения электроэнергии в утилизационном турбогенераторе. Наиболее широкое распространение в практике получили первые три схемы.

Для выявления экономического эффекта от применения указанных схем утилизации тепла уходящих газов котельных установок возможно применить предложенный профессором Бутаковым И. Н. метод теплового баланса [1], который, как будет показано ниже, учитывает влияние на к.п.д. станции не только количества тепла, взятого из уходящих газов, но и всех

<sup>1</sup>) В литературе их иногда называют утилизационными экономайзерами, низкотемпературными экономайзерами и теплофикационными экономайзерами.

изменений в работе тепловой схемы станции в целом, вызванных тем или иным способом использования этого утилизированного тепла.

При отсутствии утилизации тепла газов развернутый тепловой баланс станции (ТЭЦ) имеет вид:

$$\frac{860 \mathcal{E} + Q_{отб}}{\eta} = \frac{860 \mathcal{E}_m + Q_{отб}}{\eta_m} + \frac{860(\mathcal{E} - \mathcal{E}_m)}{\eta_k}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}$  — выработка электроэнергии станцией за рассматриваемое время, например, за год, *квт-ч/год*;

$\mathcal{E}_m$  — то же, но только на тепловом потреблении, *квт-ч/год*;

$Q_{отб}$  — выдача тепла из отборов турбин для тепловых абонентов, *ккал/год*;

$\eta_k, \eta_m, \eta$  — к. п. д. соответственно конденсационной части, противодавленческой — при полном использовании тепла и экономический к. п. д. всей станции.

Для значений  $\eta_k$  и  $\eta_m$  имеем:

$$\eta_k = \eta_{кот} \cdot \eta_{пот} \cdot \eta_{toi} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ген}, \quad (2)$$

$$\eta_m = \eta_{пот} \eta_{кот} \cdot \frac{(i_1 - i_2) \eta_{oi} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ген} + i_1 - (i_1 - i_2) \eta_{oi} - t_{конд}}{i_1 - t_{конд}} = \\ = \eta_{кот} \cdot \eta_{пот} \cdot \eta_{мех}^* \cdot \eta_{ген}^* \quad (3)$$

Здесь  $t_{конд}$  — температура конденсата в теплофикационном бойлере, °С.

При использовании тепла уходящих газов для целей теплофикации можно встретиться с двумя случаями, тепловой баланс станции для которых соответственно принимает вид:

а) утилизированное тепло вытесняет теплофикационный отбор пара (тепловая нагрузка станции  $Q_{отп}$  постоянная):

$$\frac{860 \mathcal{E} + Q'_{отб} + Q_{энд}}{\eta'} = \frac{860 \mathcal{E}'_m + Q'_{отб}}{\eta'_m} + \frac{860(\mathcal{E} - \mathcal{E}'_m)}{\eta'_k} + Q_{энд}, \quad (4)$$

б) за счет утилизированного тепла обеспечиваются дополнительные тепловые абоненты:

$$\frac{860 \mathcal{E} + Q_{отб} + Q_{энд}}{\eta''} = \frac{860 \mathcal{E}_m + Q_{отб}}{\eta''_m} + \frac{860(\mathcal{E} - \mathcal{E}_m)}{\eta''_k} + Q_{энд}, \quad (5)$$

где  $Q_{энд}$  — количество тепла от экономайзера низкого давления, отданное тепловым потребителям, *ккал/год*;

$$Q'_{отб} = Q_{отб} - Q_{энд} \text{ и } \mathcal{E}'_m = \mathcal{E}_m - \frac{Q_{отб} - Q'_{отб}}{q} = \mathcal{E}_m - \frac{Q_{энд}}{q}.$$

Здесь  $q$  — количество тепла, отпускаемое тепловым потребителям на один *квт-ч* электроэнергии, выработанной на тепловом потреблении, *ккал/квт-ч*.

Из сравнения уравнений (1), (4) и (5) видно, что с утилизацией тепла газов, кроме появления  $Q_{энд}$ , изменяются также частные к. п. д. процессов выработки электроэнергии конденсационным путем и на базе теплофикации, а при постоянной тепловой нагрузке станции и величины  $Q_{отб}$  и  $\mathcal{E}_m$ .

При утилизации части тепла из уходящих газов котел начинает выдавать большее количество тепла и его к. п. д. увеличивается, а из формул (2) и (3) видно, что увеличиваются  $\eta_k$  и  $\eta_m$  ( $\eta'_k = \eta''_k > \eta_k$  и  $\eta'_m = \eta''_m > \eta_m$ ).

При постоянной тепловой нагрузке подача тепла от экономайзера низкого давления тепловым абонентам сокращает отбор пара, а вместе с этим и выработку электроэнергии на тепловом потреблении, заменяя ее невыгодной конденсационной. В связи с этим [ $\mathcal{E}'_m < \mathcal{E}_m$  и  $\mathcal{E} - \mathcal{E}'_m > \mathcal{E} - \mathcal{E}_m$ ] возможная экономия топлива несколько сокращается. Во втором случае станция при старом расходе топлива начинает выдавать больше продукции. На практике обычно использование утилизированного тепла для целей теплофикации приводит к вытеснению отборного пара, то-есть наиболее распространенным является первый случай.

Зависимость обратной величины экономического к. п. д. станции от  $Q_{отб}$ , полученная из формул (4) и (5), имеет вид:

$$\frac{1}{\eta'} = A' + \frac{B' - A' \cdot C'}{C' + Q'_{отб}} \quad (6)$$

и

$$\frac{1}{\eta''} = A'' + \frac{B'' - A'' \cdot C''}{C'' + Q_{отб}}, \quad (7)$$

где

$$A' = A'' = \frac{1}{\eta'_m} - \frac{860}{q} \left( \frac{1}{\eta'_{\kappa}} - \frac{1}{\eta'_m} \right) = \frac{1}{\eta''_m} - \frac{860}{q} \left( \frac{1}{\eta''_{\kappa}} - \frac{1}{\eta''_m} \right),$$

$$B' = B'' = \frac{860 \mathcal{E}}{\eta'_{\kappa}} + Q_{энд} = \frac{860 \mathcal{E}}{\eta''_{\kappa}} + Q_{энд}$$

и

$$C' = C'' = 860 \mathcal{E} + Q_{энд}.$$

Из формул (6) и (7) ясно усматривается, что

$$\frac{1}{\eta''} < \frac{1}{\eta'} < \frac{1}{\eta} \quad \text{и} \quad \eta'' > \eta' > \eta.$$

Зависимости  $1/\eta'$  от  $Q'_{отб}$  и  $1/\eta''$  от  $Q_{отб}$ , отображаемые формулами (6) и (7), представлены одной и той же гиперболой на рис. 1 [гипербола 3 соответствует длительности отопительного сезона в 2500 час/год, а гипербола 4—5500 час/год]. Кривые построены для станции с двумя турбогенераторами типа АТ—25—1 и АК—25—1, у которой:

$$860 \mathcal{E} = 301000 \frac{\text{млн.ккал}}{\text{год}};$$

$$\eta_{кот} = 0,865; \quad \eta_m = 0,822; \quad \eta_{\kappa}^{AT} = 0,242; \quad \eta_{\kappa}^{AK} = 0,248; \quad P_{отб} = 1,2 \text{ ата};$$

$$q = 3730 \text{ ккал/квт-ч}; \quad Q_{энд}^{нас} = 3,0 \text{ млн.ккал/час}.$$

На этом же рисунке цифрой 1 помечена гипербола зависимости  $1/\eta$  от  $Q_{отб}$  (утилизация отсутствует).

Запишем тепловой баланс конденсационной станции с использованием тепла уходящих газов в системе регенеративного подогрева питательной воды:

$$\frac{860 \mathcal{E}}{\eta^P} = \frac{860 \mathcal{E}}{\eta_{\kappa}^P}, \quad (8)$$

или

$$\frac{1}{\eta^P} = \frac{1}{\eta_{\kappa}^P}. \quad (9)$$

При отсутствии же утилизации:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\eta_k} \quad (10)$$

для значения  $\eta_k^P$  имеем:

$$\eta_k^P = \eta_{кот}^P \cdot \eta_{пот} \cdot \eta_{toi}^P \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ген} \dots \quad (2')$$

Из сравнения к. п. д. выработки электроэнергии  $\eta_k$  и  $\eta_k^P$  по формулам (2) и (2') видно, что при использовании тепла уходящих газов в системе

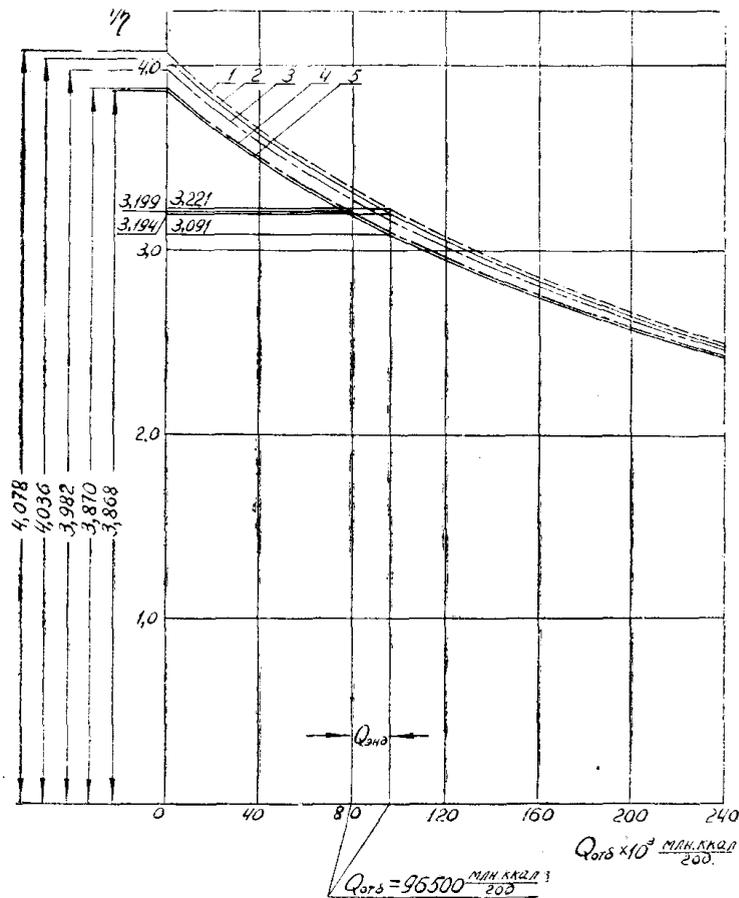


Рис. 1.

регенерации турбин происходит изменение к. п. д. котельного агрегата и абсолютного внутреннего к. п. д. В связи с утилизацией к. п. д. котла увеличивается ( $\eta_{кот}^P > \eta_{кот}$ ) и  $\eta_k$  должен возрасти. С другой стороны подогрев конденсата турбины уходящими газами приводит к сокращению регенеративного отбора, что снижает абсолютный внутренний к. п. д. ( $\eta_{toi}^P < \eta_{toi}$ ), а значит, и  $\eta_k$ . Но так как увеличение  $\eta_{кот}$  по своей абсолютной величине больше, чем уменьшение  $\eta_{toi}$ , то происходит рост к. п. д.  $\eta_k$  и соответственно  $\eta_k^P = \eta_k$ .

Разбираемая схема утилизации также приводит к недополучению некоторой экономии топлива вследствие ухудшения термического к. п. д. цикла: сокращение регенеративного отбора приводит к сокращению выработки выгодных для нас *квтчас* без потери в конденсатор. Комбинированное использование тепла уходящих газов (для целей теплофикации и в системе регенерации) и использование утилизированного тепла для нужд бытового или производственного горячего водоснабжения не рассматриваем здесь, так как изменения в тепловом балансе станции при этом и определение эффективности их аналогичны разобранным выше схемам утилизации.

Для предварительного подогрева воздуха перед поступлением его в воздухоподогреватель выгоднее использовать отборный пар турбин, что и установлено на практике. Действительно, увеличение количества отъемного пара уменьшает потерю тепла с циркуляционной водой конденсационной части и расширяет выработку электроэнергии на базе теплового потребления в течение всего года. Поэтому эту схему утилизации также не рассматриваем.

Остановимся несколько подробнее на использовании тепла уходящих газов для получения электроэнергии в особой утилизационной установке.

Для станции, утилизирующей тепло уходящих газов по указанной схеме, развернутый тепловой баланс может быть представлен в таком виде:

а) электроэнергия от утилизационной установки обеспечивает дополнительных электрических потребителей:

$$\frac{860 \mathcal{E} + Q_{отб} + 860 \mathcal{E}_{ум}}{\eta_1^{\mathcal{E}}} = \frac{860 \mathcal{E}_m + Q_{отб}}{\eta_{m1}^{\mathcal{E}}} + \frac{860 (\mathcal{E} - \mathcal{E}_m)}{\eta_{к1}^{\mathcal{E}}} + 860 \mathcal{E}_{ум}, \quad (11)$$

б) электроэнергия от утилизационной установки вытесняет часть конденсационных *квт-ч* главных машин (электрическая нагрузка станции постоянная):

$$\frac{860 \mathcal{E} + Q_{отб}}{\eta_{II}^{\mathcal{E}}} = \frac{860 \mathcal{E}_m + Q_{отб}}{\eta_{mII}^{\mathcal{E}}} + \frac{860 (\mathcal{E} - \mathcal{E}_m - \mathcal{E}_{ум})}{\eta_{кII}^{\mathcal{E}}} + 860 \mathcal{E}_{ум}. \quad (12)$$

Здесь  $860 \mathcal{E}_{ум} = \eta_{ум} \cdot Q_{энд}$ , (13)

где  $\eta_{ум}$  — к. п. д., характеризующий процесс выработки электроэнергии утилизационной установкой (абсолютный электрический к. п. д. ее).

С утилизацией тепла газов возрастает к. п. д. котла и соответственно  $\eta_{к}$  и  $\eta_m$  ( $\eta_{m1}^{\mathcal{E}} = \eta_{mII}^{\mathcal{E}} > \eta_m$  и  $\eta_{к1}^{\mathcal{E}} = \eta_{кII}^{\mathcal{E}} > \eta_{к}$ ), причем все потери, связанные с производством электроэнергии в утилизационной установке, относятся на счет котла. Кроме этого в первом случае станция начинает выдавать потребителям большее количество электроэнергии, а во втором случае заменяет частично невыгодные конденсационные *квт-ч*.

Зависимость обратной величины экономического к. п. д. станции от  $Q_{отб}$  может быть получена из уравнений (11) и (12):

$$\frac{1}{\eta_1^{\mathcal{E}}} = A_1^{\mathcal{E}} + \frac{B_1^{\mathcal{E}} - A_1^{\mathcal{E}} \cdot C_1^{\mathcal{E}}}{C_1^{\mathcal{E}} + Q_{отб}} \quad (14)$$

и

$$\frac{1}{\eta_{II}^{\mathcal{E}}} = A_{II}^{\mathcal{E}} + \frac{B_{II}^{\mathcal{E}} - A_{II}^{\mathcal{E}} \cdot C_{II}^{\mathcal{E}}}{C_{II}^{\mathcal{E}} + Q_{отб}}, \quad (15)$$

где

$$A_1^{\mathcal{E}} = A_{II}^{\mathcal{E}} = \frac{1}{\eta_1^{\mathcal{E}}} - \frac{860}{q} \left( \frac{1}{\eta_{к1}^{\mathcal{E}}} - \frac{1}{\eta_{m1}^{\mathcal{E}}} \right) = \frac{1}{\eta_{mII}^{\mathcal{E}}} - \frac{860}{q} \left( \frac{1}{\eta_{кII}^{\mathcal{E}}} - \frac{1}{\eta_{mII}^{\mathcal{E}}} \right),$$

$$B_1^{\mathcal{E}} = \frac{860 \mathcal{E}}{\eta_{к1}^{\mathcal{E}}} + 860 \mathcal{E}_{ум}, \quad B_{II}^{\mathcal{E}} = \frac{860 \mathcal{E}}{\eta_{кII}^{\mathcal{E}}} - 860 \mathcal{E}_{ум} \left( \frac{1}{\eta_{кII}^{\mathcal{E}}} - 1 \right),$$

$C_1^{\mathcal{E}} = 860 \mathcal{E} + 860 \mathcal{E}_{ум}$  и  $C_{II}^{\mathcal{E}} = 860 \mathcal{E}$  являются постоянными величинами.

Выразив постоянные формулы (15) соответственно через  $A_1^{\mathcal{E}}$ ,  $B_1^{\mathcal{E}}$  и  $C_1^{\mathcal{E}}$  и проделав простые преобразования, получаем:

$$\frac{1}{\eta_{II}^2} = A_1^2 + \frac{B_1^2 - A_1^2 \cdot C_1^2 - 860 \mathcal{E}_{ym} (1/\eta_{kl}^2 - A_1^2)}{C_1^2 + Q_{отб} - 860 \mathcal{E}_{ym}}. \quad (15')$$

Так как величина  $A_1^2 < 1,0$  то из формул (14) и (15') усматривается, что в условиях одной и той же станции  $1/\eta_{II}^2 < 1/\eta_I^2 < 1/\eta$  и  $\eta_{II}^2 > \eta_I^2 > \eta$ . Дополнительно указанные схемы утилизации позволяют получить конденсат для питания котлов, что особенно важно при высоких давлениях.

Основными преимуществами получения электроэнергии перед другими способами использования утилизированного тепла являются:

1. Получение электроэнергии обеспечивает круглогодичную утилизацию и не ухудшает режима работы основного оборудования станции.

2. Этот способ не вступает в противоречие с развитием теплофикации.

3. Он позволяет использовать тепло уходящих газов всех работающих котлов станции, так как потребность в электроэнергии растет обычно быстрее, чем возможность удовлетворять ее.

4. Дополнительно к электроэнергии станция получает конденсат.

5. Если дополнительной потребности в электроэнергии нет, то электроэнергия от утилизационной установки вытесняет невыгодные для нас конденсационные *квт-ч*.

Основными недостатками разбираемой схемы являются ее громоздкость и низкий коэффициент использования утилизированного из уходящих газов тепла.

Коэффициент использования утилизированного тепла можно значительно повысить, если воспользоваться схемой, предложенной В. А. Успенским (УОВТИ), по которой тепло циркуляционной воды используется как изолятор остекленной поверхности для нужд агротеплофикации. Это находится в соответствии с Постановлением сентябрьского пленума ЦК КПСС, где записано: „...широко использовать для обогрева парников, теплиц и утепления грунта тепловые отходы промышленных предприятий“.

Тогда имеем:

$$\frac{860 \mathcal{E} + Q_{отб} + 860 \mathcal{E}_{ym} + Q_{ym}^{agr}}{\eta_1^*} = \frac{860 \mathcal{E}_m + Q_{отб}}{\eta_m^*} + \frac{860 (\mathcal{E} - \mathcal{E}_m)}{\eta_k^*} + 860 \mathcal{E}_{ym} + Q_{ym}^{agr} \quad (16)$$

и

$$\frac{1}{\eta_1^*} = A^* + \frac{B^* - A^* \cdot C^*}{C^* + Q_{отб}}, \quad (17)$$

где

$$A^* = \frac{1}{\eta_m^*} - \frac{860}{q} \left( \frac{1}{\eta_k^*} - \frac{1}{\eta_m^*} \right), \quad B^* = \frac{860 \mathcal{E}}{\eta_k^*} + 860 \mathcal{E}_{ym} + Q_{ym}^{agr},$$

$$C^* = 860 \mathcal{E} + 860 \mathcal{E}_{ym} + Q_{ym}^{agr}.$$

Использование тепла циркуляционной воды позволяет значительно увеличить частные коэффициенты  $\eta_m^* > \eta_m$  и  $\eta_k^* > \eta_k$  и добавочно обеспечить теплом агротепличное хозяйство.

Для частного примера станции, указанного выше, на рис. 1 представлены гиперболические зависимости, отображаемые формулами (14)—кривая 2 и (17)—кривая 5.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Н. Бугаков—Коэффициент полезного действия теплосилового устройства и энергосистемы. Известия ТПИ, т. 66, в. 2, 1948.