

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ АБСОЛЮТНОЙ ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

В. Е. ЦЕЛЕБРОВСКИЙ

(Основные обозначения см. стр. 102—103)

Работая на вторичных энергетических ресурсах, утилизационная установка создает возможности дальнейшего использования части энергии, которая раньше считалась потерями технологического процесса. Однако это количество энергии еще не определяет абсолютной экономии топлива, получающейся от работы утилизационной установки. Если рассматривать использование тепловых ресурсов для производства технологической продукции на основном агрегате и энергетической продукции на утилизационной установке как совместный энерготехнологический процесс, то количество энергии, использованное утилизационной установкой, может служить основой для перераспределения первичных энергоресурсов этого процесса между двумя видами выпускаемой конечной продукции. Это, например, необходимо делать при определении себестоимости производства того и другого вида продукции. Но для того, чтобы определить абсолютную экономию топлива от работы утилизационной установки, необходимо учесть и те взаимосвязи, которые она всегда имеет через потребителей энергии с энергоустановками, работающими на первичных энергоресурсах: ТЭЦ, заводскими котельными и т. д. Иными словами, эту абсолютную экономию топлива мы можем правильно определить только путем сравнения его затрат на производство одинакового количества энергетической и технологической продукции при участии утилизационной установки и без нее.

Разберем частный пример работы мартеновской печи с энергетической утилизационной установкой.

Предположим, что до строительства утилизационной установки при мартеновской печи на технологический процесс производства G тонн год стали расходовалось $Q^m + Q^d$ ккал/год тепла (Q^m —тепло топлива, Q^d — тепло других источников). Из этого количества использовалось Q'_u ккал/год, остальное составляли потери. На производство $\mathcal{E}$ квтч/год электроэнергии и $Q_{отб}$ ккал/год тепла расходовалось на ТЭЦ $Q_{тэц}$ ккал/год тепла в топливе. Утилизационная установка стала использовать из вторичных энергоресурсов мартеновской печи $Q_{уу}$ ккал/год и выпускать за счет этого определенное количество энергетической продукции. Это сократило потери процесса или, иначе говоря, улучшило его тепловой экономический к.п.д. ($\eta_{тэ}$). Этот к.п.д. можно определить в последнем случае из выражения:

$$\eta_{тэ} = 1 - \frac{Q'_u + Q_{уу}}{Q^m + Q^d}.$$

Расход тепла на выпуск G тонн/год стали в результате работы утилизационной установки уменьшился на величину $\frac{Q_{уу}^1)}{\eta_{тэ}^м}$, то есть стал равным

$$Q^т + Q^д - \frac{Q_{уу}}{\eta_{тэ}^м}.$$

Одновременно уменьшился и расход топлива на ТЭЦ, так как часть необходимой электрической и тепловой энергии стала выдавать потребителям утилизационная установка.

Обозначим новую величину расхода тепла в первичных энергоресурсах на производство прежнего количества энергетической продукции через $Q_{тэц}^{уу}$. Тогда общий расход тепла в первичных энергоресурсах экономически объединенной энерготехнологической системы для двух рассматриваемых положений определится следующим образом.

Без утилизационной установки:

$$Q^т + Q^д + Q_{тэц} \text{ ккал/год.} \quad (а)$$

С утилизационной установкой:

$$Q^т + Q^д - \frac{Q_{уу}}{\eta_{тэ}^м} + Q_{тэц}^{уу} \text{ ккал/год.} \quad (б)$$

Интересующая нас абсолютная экономия тепла первичных энергоресурсов, получающаяся в результате работы утилизационной установки, определится как разница (а) и (б). Обозначим эту разницу через $\Delta Q_{уу}$.

$$\Delta Q_{уу} = Q_{тэц} + \frac{Q_{уу}}{\eta_{тэ}^м} - Q_{тэц}^{уу} \text{ ккал/час.} \quad (1)$$

Все величины, входящие в уравнение (1), можно определить из тепловых балансов.

Наибольшие возможности для учета всех основных факторов, влияющих на расход топлива в системе, открываются при использовании методики составления энергетических балансов при комбинированном производстве тепла и электроэнергии, разработанной проф. И. Н. Бутаковым (И. Н. Бутаков, „Теплосиловые установки“, ч. 1, 1954 г.). По этой методике общий расход тепла в топливе, расходуемом на ТЭЦ, определяется из выражения:

$$Q_{тэц} = \frac{860 \left(\mathcal{E} - \frac{Q_{отб}}{q} \right)}{\eta_{тк}} + \frac{860 \frac{Q_{отб}}{q} + Q_{отб}}{\eta_{тм}} + \frac{Q_{проу}}{\eta_{тк} \eta_{пот}} \text{ ккал/год;} \quad (А)$$

здесь: $\mathcal{E}$ квт-ч/год—общая выработка электрической энергии,

$Q_{отб}$ ккал/год—выработка тепла через отборы и противодавление турбин,

¹⁾ Более подробно этот вопрос рассматривается в статье автора „К вопросу выбора энергетической установки, работающей на вторичных энергоресурсах мартеновских цехов“, публикуемой в этом же томе Известий.

q ккал/квт-ч — удельный показатель, определяющий количество тепла, отпускаемого потребителям через отборы или противодавление турбин на каждый квт-ч электроэнергии, вырабатываемой на тепловом потреблении,

$\frac{Q_{отб}}{q}$ квт-ч/год — количество электроэнергии, выработанной на тепловом потреблении,

$Q_{гор}$ ккал/год — выдача тепла на сторону в остром паре,

η_k — к. п. д. конденсационной части ТЭЦ,

$\eta_{пт}$ — к. п. д. теплофикационной „ „

$\eta_{ку}$ — к. п. д. котельной,

$\eta_{пот}$ — к. п. д. потока тепла на ТЭЦ.

Вторичные энергетические ресурсы могут использоваться для получения в утилизационной установке тепла, электроэнергии на тепловом потреблении и электроэнергии на конденсационных турбинах. Наиболее общим случаем будет работа утилизационной установки, состоящей из котла и турбогенератора с отборами пара из промежуточных ступеней.

Обозначим через $Q_{уу}^{отб}$ ккал/год количество тепла, которое теоретически можно получить из отборов турбин при использовании $Q_{уу}$ ккал/год тепла вторичных энергоресурсов. Это количество определяется конструктивными особенностями используемых турбин и может быть вычислено из следующих соображений.

Обозначим: G_1 — количество пара поступающего в турбину, $G_{отб}$ — количество пара, которое можно теоретически получить из отборов турбин.

Отношение $\frac{G_{отб}}{G_1} = \alpha$. Теплосодержание пара и конденсата в различных точках обозначим через i с соответствующими индексами: i_1 — острого пара, i_n — пара в отборах турбин, $i_{нс}$ — питательной воды, i_k^1 — конденсата возврата отбора, i_k — конденсата из конденсатора турбины.

При этом теплосодержание питательной воды, являющейся смесью конденсата турбин и конденсата возврата отбора, может быть определено из выражения: $i_{нс} = \alpha(i_k^1 - i_k) + i_k$. Используя принятые обозначения, мы можем представить тепловой баланс утилизационного агрегата в следующем виде:

$$G_1(i_1 - i_{нс}) = \alpha G_1(i_1 - i_n) + \alpha G_1(i_n - i_k^1) + (1 - \alpha) G_1(i_1 - i_k).$$

Произведя замены из очевидных равенств $Q_{уу}^{отб} = \alpha G_1(i_n - i_k^1)$, $G_1(i_1 - i_{нс}) = \eta_{ут} Q_{уу}$, где $\eta_{ут}$ к. п. д. котла утилизатора по отношению ко вторичным энергоресурсам, использованным в котле, и выразив теплосодержание питательной воды через i_k и i_k^1 , после элементарных алгебраических преобразований получаем:

$$Q_{уу}^{отб} = \frac{\alpha(i_n - i_k^1)}{i_1 + i_k - \alpha(i_k^1 - i_k)} \eta_{ут} Q_{уу}. \quad (a)$$

Обозначив дробь, входящую в уравнение (a), через ξ , будем иметь следующее выражение:

$$Q_{уу}^{отб} = \xi \eta_{ут} Q_{уу} \text{ ккал/год}. \quad (2)$$

В связи с тем, что потребность в тепле в течение года может резко изменяться, становясь в определенные периоды ниже, чем можно получить из отборов утилизационной установки, последняя в эти периоды вынуждена работать с увеличенной выработкой электроэнергии на конденсационном

режиме. Если обозначить через T — число часов использования возможного максимума отборов в течение года, то коэффициент использования отборов можно представить в виде:

$$\eta_{iu} = \frac{T}{8760}.$$

Энергетическая продукция, получаемая от утилизационной установки в течение года, может быть определена из энергетического баланса следующего вида:

$$Q_{yy} = \frac{860 \mathcal{E}_{yy}^{\kappa}}{\eta_{yy}^{\kappa}} + \frac{860 \eta_{iu} Q_{yy}^{omb}}{\eta_{yy}^m q_{yy}} + \frac{\eta_{iu} Q_{yy}^{omb}}{\eta_{yy}^m} \text{ ккал/год} \quad (в)$$

Все коэффициенты, входящие в уравнение (в), имеют для утилизационной установки аналогичное значение, что и соответствующие коэффициенты для ТЭЦ в ранее приведенном выражении ее энергетического баланса.

Из выражения (в) легко получить уравнения для определения количества электроэнергии, вырабатываемой на конденсационном режиме ($\mathcal{E}_{yy}^{\kappa}$),

$$\mathcal{E}_{yy}^{\kappa} = \frac{\eta_{yy}^{\kappa}}{860} Q_{yy} - \left(\frac{1}{q_{yy}} + \frac{1}{860} \right) \frac{\eta_{yy}^{\kappa} \eta_{iu}}{\eta_{yy}^m} Q_{yy}^{omb} \text{ кВт-ч/год} \quad (3)$$

и электроэнергии на тепловом потреблении:

$$\mathcal{E}_{yy}^m = \frac{\eta_{iu} Q_{yy}^{omb}}{q_{yy}} = \frac{\xi \eta_{iu} \eta_{ym}}{q_{yy}} Q_{yy} \text{ кВт-ч/год}.$$

Для определения $Q_{mэц}^{yy}$ составим энергетический баланс для системы с утилизационной установкой, приведенный к теплу в первичных энергоресурсах. По принятой методике этот баланс запишется следующим выражением:

$$\begin{aligned} Q_{mэц}^{yy} = & \frac{860 \left[\mathcal{E} - \mathcal{E}_{yy}^{\kappa} - \mathcal{E}_{yy}^m - \frac{Q_{omb} - \eta_{iu} Q_{yy}^{omb}}{q} \right]}{\eta_{\kappa}} + \\ & + \frac{860 \frac{Q_{omb} - \eta_{iu} Q_{yy}^{omb}}{q} + Q_{omb} - \eta_{iu} Q_{yy}^{omb}}{\eta_m} + \\ & + \frac{Q_{роу}}{\eta_{ку} \eta_{пот}} + \frac{Q_{yy}}{\eta_{mэ}^m} \text{ ккал/год}. \end{aligned} \quad (Б)$$

Подставив в выражение (1) значение $Q_{mэц}$ и $Q_{mэц}^{yy}$ из выражений (А) и (Б) и, сделав соответствующие замены на основании зависимостей (2) и (3), получим следующее уравнение, выражающее зависимость ΔQ_{yy} от величины Q_{yy} для случая работы утилизационной установки на турбогенераторах с отборами пара:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{yy} = & \frac{\eta_{yy}^{\kappa} Q_{yy}}{\eta_{\kappa}} + \left[\frac{860}{q} \left(\frac{1}{\eta_m} - \frac{1}{\eta_{\kappa}} \right) + \frac{1}{\eta_m} + \right. \\ & \left. + \frac{860}{\eta_{\kappa} q_{yy}} - \frac{\eta_{yy}^{\kappa}}{\eta_{\kappa} \eta_{yy}^m} \left(\frac{860}{q_{yy}} + 1 \right) \right] \xi \eta_{iu} \eta_{ym} Q_{yy} \text{ ккал/год}. \end{aligned} \quad (4)$$

Если утилизационная установка вырабатывает электроэнергию на чисто конденсационном режиме, то количество выработанной электроэнергии определится из выражения:

$$\mathcal{E}_{yy}^{\kappa} = -\frac{\gamma_{lyy}^{\kappa}}{860} Q_{yy} \text{ квт-ч/год.}$$

В этом случае величина отборов $Q_{yy}^{отб} = \xi \gamma_{lyt} Q_{yy}$ равна нулю. Общее уравнение (4) для частного случая примет вид:

$$\Delta Q_{yy} = \frac{\gamma_{lyy}^{\kappa}}{\gamma_{lk}} Q_{yy} \text{ ккал/год.} \quad (5)$$

Когда утилизационная установка вырабатывает только одну тепловую энергию, годовая выработка ее определится из выражения: $\gamma_{li} \gamma_{lyt} Q_{yy}$. Следует иметь в виду, что тепло, вырабатываемое на утилизационной установке, может заменять или тепло острого пара (РОУ), или тепло отборов, или и то и другое вместе.

В общем случае всю выработку тепла можно представить себе состоящей из двух частей:

$$\gamma_{li} \gamma_{lyt} Q_{yy} = \gamma_{li} \gamma_{lyt} Q_{yy}^I + \gamma_{li} \gamma_{lyt} Q_{yy}^{II}.$$

Здесь в правой части равенства первый член определяет сокращение выдачи тепла через РОУ ТЭЦ в связи с заменой его теплом утилизационной установки. Второй член $\gamma_{li} \gamma_{lyt} Q_{yy}^{II}$ определяет аналогичное сокращение выдачи тепла через отборы турбин.

При выработке на утилизационной установке только одного тепла $\mathcal{E}_{yy}^{\kappa} = 0$, $\mathcal{E}_{yy}^m = 0$, $G^{отб} = G_1$, $i_n = i_1$, $i_{nv} = i_{\kappa}$, следовательно $q = \infty$, $\gamma_{lyy}^{\kappa} = 0$, $\gamma_{lyy}^m = 0$, $\alpha = 1$. Имея это в виду, можно с помощью энергетического баланса объединенной системы (ТЭЦ—утилизационная установка) методом аналогичным предыдущему получить следующее выражение для определения абсолютной экономии тепла в топливе для рассматриваемого общего случая:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{yy} = & \left[\frac{860 \gamma_{li} \gamma_{lyt}}{q} \left(\frac{1}{\gamma_{lt}} - \frac{1}{\gamma_{lk}} \right) + \frac{\gamma_{li} \gamma_{lyt}}{\gamma_{lt}} \right] Q_{yy}^{II} + \\ & + \frac{\gamma_{li} \gamma_{lyt}}{\gamma_{ky} \gamma_{lnom}} Q_{yy}^I \text{ ккал/год.} \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение для случаев, когда тепло утилизационной установки вытесняет или тепло отборов, или тепло РОУ, легко получить, если в уравнении (6) значения Q_{yy}^{II} и Q_{yy}^I поочередно принять равными нулю.

Третий частный случай будет, когда утилизационная установка работает с использованием тепла противодавленческих турбоагрегатов.

Рассуждая аналогично случаю работы турбины с отборами пара и применяя те же обозначения, можно выразить зависимость $Q_{yy}^{отб} = f(Q_{yy})$ следующим уравнением:

$$Q_{yy}^{отб} = \frac{i_n - i_{\kappa}}{i_1 - i_{\kappa}} \gamma_{lyt} Q_{yy}. \quad (7)$$

Количество тепла, используемого в течение года из пара противодавления, определяется аналогично предыдущему при помощи коэффициента использования тепла γ_{li} . В те периоды, когда тепло противодавления не может

использоваться полностью, установка будет работать „на выхлоп“ и вырабатывать электроэнергию $\mathcal{E}_{yy}^s$ с очень низким к.п.д., который обозначим через η_{yy}^s . С учетом вышесказанного энергетический баланс противоаварийной утилизационной установки, приведенной к теплу вторичных энергоресурсов, запишется следующим образом:

$$Q_{yy} = \frac{860 \frac{\eta_{iu} Q_{yy}^{отб}}{q_{yy}} + \eta_{iu} Q_{yy}^{отб}}{\eta_{yy}^m} + \frac{860 \mathcal{E}_{yy}^s}{\eta_{yy}^s} \text{ ккал/год.}$$

Из этого уравнения можно получить значение $\mathcal{E}_{yy}^m$ и $\mathcal{E}_{yy}^s$ в явном виде:

$$\mathcal{E}_{yy}^s = \frac{\eta_{yy}^s Q_{yy}}{860} - \frac{\eta_{yy}^s \eta_{iu}}{\eta_{yy}^m} \left(\frac{1}{q_{yy}} + \frac{1}{860} \right) Q_{yy}^{отб} \text{ кВт-ч/год,} \quad (8)$$

$$\mathcal{E}_{yy}^m = \frac{\eta_{iu} Q_{yy}^{отб}}{q_{yy}} \text{ кВт-ч/год.} \quad (9)$$

Работу противоаварийной турбины „на выхлоп“ можно представить себе как работу конденсационного турбоагрегата при $\eta_{yy}^k = \eta_{yy}^s$. При использовании же тепла пара противоаварийной энергетической турбины как агрегата преобразователя будет одинаков с теплофикационной частью турбоагрегата с отборами пара, если их экономические к.п.д. η_{yy}^m будут равны. Это обстоятельство позволяет нам воспользоваться формулой (4), из которой при $\eta_{yy}^k = \eta_{yy}^s$ мы получим уравнение для определения абсолютной годовой экономии тепла в топливе для рассматриваемого случая. К такому же уравнению можно придти, воспользовавшись ранее рассмотренной методикой вывода с помощью энергетического баланса объединенной энергетической системы. В конечном виде искомая зависимость изобразится следующим уравнением:

$$\Delta Q_{yy} = \left\{ \frac{\eta_{yy}^s}{\eta_{ik}} + \left[\frac{860}{q} \left(\frac{1}{\eta_{im}} - \frac{1}{\eta_{ik}} \right) + \frac{1}{\eta_{im}} + \frac{860}{\eta_{ik} q_{yy}} - \frac{\eta_{yy}^s}{\eta_{ik} \eta_{yy}^m} \left(\frac{860}{q_{yy}} + 1 \right) \right] \xi' \eta_{iu} \eta_{iyt} \right\} Q_{yy} \text{ ккал/год.} \quad (10)$$

Входящий в уравнение коэффициент $\xi' = \frac{i_n - i_{ik}}{i_1 - i_{ik}}$, значение всех остальных

коэффициентов дано в предыдущем изложении.

Если утилизационная установка и ТЭЦ будут иметь одинаковые среднегодовые экономические показатели ($\eta_{ik} = \eta_{yy}^k$, $q = q_{yy}$, $\eta_{im} = \eta_{yy}^m$), то зависи-

мости (4), (5) и (10) значительно упрощаются. Так, уравнения (4) и (5) окажутся одинаковыми и будут равны:

$$\Delta Q_{yy} = Q_{yy} \text{ ккал/год.} \quad (4a)$$

Уравнение (10) примет вид:

$$\Delta Q_{yy} = \frac{\eta_{yy}^B Q_{yy}}{\eta_{ik}} + \left[\left(\frac{860}{q} + 1 \right) \left(\frac{1}{\eta_{im}} - \frac{\eta_{yy}^B}{\eta_{ik} \eta_{im}} \right) \right] \xi' \eta_{ii} \eta_{ym} Q_{yy} \text{ ккал/год.} \quad (10a)$$

В практических условиях равенства $\eta_{yy}^B = \eta_{ik}$ и $q = q_{yy}$ могут иметь место очень часто. Однако к. п. д. η_{yy}^m , как правило, будет всегда выше, чем к. п. д. η_{im} . Это объясняется тем, что при вычислении η_{yy}^m используется более высокий к. п. д. η_{ym} , вместо η_{ky} , который входит в виде сомножителя в значение к. п. д. η_{im} .

В последнем случае формулы (4), (5), (10) примут вид: формула (4),

$$\Delta Q_{yy} = Q_{yy} + \left[\left(\frac{1}{\eta_{im}} - \frac{1}{\eta_{yy}^m} \right) \left(\frac{860}{q} + 1 \right) \right] \xi \eta_{ii} \eta_{ym} Q_{yy} \text{ ккал/год,} \quad (46)$$

уравнение (5) останется в виде: $\Delta Q_{yy} = Q_{yy} \text{ ккал/год,}$

уравнение (10) примет вид:

$$\Delta Q_{yy} = \frac{\eta_{yy}^B Q_{yy}}{\eta_{ik}} + \left[\left(\frac{1}{\eta_{im}} - \frac{\eta_{yy}^B}{\eta_{ik} \eta_{yy}^m} \right) \left(\frac{860}{q} + 1 \right) \right] \xi' \eta_{ii} \eta_{ym} Q_{yy} \text{ ккал/год.} \quad (106)$$

Анализ получившихся зависимостей (4), (5), (6), (10) и их упрощенных вариантов позволяет рельефно выявить большие преимущества организации на утилизационной установке комбинированной выработки электроэнергии и тепла по сравнению с раздельной. Так например, уравнение (46) сразу показывает, что в случае использования на утилизационной установке турбин с отборами пара, экономия тепла в первичных энергоресурсах на ТЭЦ получается всегда больше, чем использует утилизационная установка из вторичных энергоресурсов. Это ясно, если учесть, что это уравнение составлено для случая, когда $\eta_{yy}^m > \eta_{im}$. Обратный случай, когда $\eta_{yy}^m < \eta_{im}$, практически трудно представить. Решая уравнение (106) с конкретными значениями входящих в него коэффициентов, легко обнаружить, что и в случае использования турбин с противодавлением экономия первичных энергоресурсов будет больше, чем количество тепла, взятое утилизационной установкой из ВЭР (Q_{yy}), вплоть до совсем небольшого значения $\eta_{ii} = 0,35 - 0,4$. Значению $\eta_{ii} = 0,35 - 0,4$ соответствует, как известно, коэффициент числа часов использования теплового максимума (Т) всего 3000—3500 час/год. При тех же условиях, на чисто электроэнергетическом или теплоэнергетическом вариантах утилизационных установок, как показывает анализ формул (5) и (6), такой экономии первичных энергоресурсов добиться нельзя.

При самом эффективном для теплоэнергетического варианта случае, когда тепло, вырабатываемое на утилизационной установке, заменяет тепло острого пара, выдаваемого через РОУ или получаемого от самостоятельных котельных ($Q_{yy}^I = Q_{yy}$), при $\eta_{ii} = 0,35 - 0,4$, экономия тепла в первичных энергоресурсах будет составлять только 40—50% от тепла вторичных энергоресурсов, используемых утилизационной установкой (Q_{yy}).

В том же случае, когда тепло утилизационной установки заменяет тепло отборов турбин ТЭЦ, эффект еще уменьшается. Так, например, в случае, когда тепло утилизационной установки заменяет отборный пар давлением 3 атa при $\eta_{ll} = 0,4$, экономия в первичных энергоресурсах на ТЭЦ составит всего 34% от Q_{yy} . При замене отбора давлением $1,2 \text{ атa}$, экономия в первичных энергоресурсах будет еще меньше и составит всего 27% от Q_{yy} .

В случае электроэнергетического варианта утилизационной установки, когда $\eta_k = \eta_{yy}^k$, как показывает формула (5), экономия тепла первичных энергоресурсов будет равна Q_{yy} , то есть опять меньше, чем для варианта, использующего турбины с отборами пара при тех же условиях.

Совершенно очевидно, что все входящие в уравнения (4), (5), (6) и (10) к. п. д. должны быть взяты, как к. п. д. нетто, т. е. с учетом расхода на собственные нужды энергетических агрегатов. В противном случае мы не получим ни правильного вывода об абсолютной экономии топлива, ни правильной ориентировки при сравнении вариантов, поскольку расходы на собственные нужды для различных вариантов утилизационных установок различны.
