

УДК 621.003.19

## ТОПЛИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЭЦ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЕЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

**Докт. техн. наук, проф. ПИИР А. Э.**

*Архангельский государственный технический университет*

**Докт. техн. наук, проф. КУНТЫШ В. Б.**

*Белорусский государственный технологический университет*

В рыночных условиях хозяйствования для ряда комбинированных энергоустановок остро встала проблема сбыта энергии из-за ее высокой стоимости: сначала тепловой, вычисленной по физическому методу разделения общего расхода топлива, затем электрической, вычисленной по эксергетическому методу, а то и обоих видов продукции ТЭЦ, стоимость которых была вычислена по компромиссному методу ОРГРЭС 1996 г.

После продолжительной дискуссии для выхода из кризиса было решено [1] изменить принцип формирования тарифов на ТЭЦ, а именно – отделить решение задачи прогнозирования цены энергии от результатов оценки эффективности производственной деятельности ТЭЦ. Это позволяет отказаться от условных показателей тепловой экономичности ТЭЦ на основе действующих с 1996 г. методических указаний ОРГРЭС в пользу термодинамических строгих и простых показателей.

Авторы предлагают предельно упростить определение показателей тепловой и экономической эффективности ТЭЦ:

- рассматривая комбинированную установку как генератор эксергии, которая отпускается с шин и коллекторов ТЭЦ с потоками различных энергоносителей (пара, горячей воды, электронов);
- отказываясь от условного деления оборудования на относящееся к выработке электроэнергии или теплоты, поскольку турбина, электрические генератор и трансформатор столь же необходимы для выработки пара в отопительном отборе, как сетевой насос и сетевой подогреватель для выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Ранее было показано [2], что удельные расходы условного топлива на ТЭЦ можно определить по температурам цикла Ренкина без привлечения дополнительных условий, таких как коэффициент отнесения расхода топ-

лива по видам продукции или использование специальных функций, эксергия или коэффициент ценности теплоты.

Покажем, что объективные термодинамические характеристики комбинированной установки [3] вытекают из ее энергетического баланса. Запишем тепловой баланс паровой турбины с промышленным  $Q_{\text{п}}$  и отопительным  $Q_{\text{о}}$  отборами пара [4]

$$\eta_{\text{пк}} \eta_{\text{тр}} B_y Q_y = W + Q_{\text{п}} + Q_{\text{о}} + Q_{\text{к}}, \quad (1)$$

где  $B_y, Q_y$  – расход и теплота сгорания условного топлива;  $\eta_{\text{пк}}, \eta_{\text{тр}}$  – КПД парового котла, трубопроводов;  $W$  – электрическая нагрузка турбогенератора;  $Q_{\text{к}}$  – непревратимая в работу теплота, переданная окружающей среде в конденсаторе.

Тепловому балансу турбины соответствует эксергетический баланс [5]

$$\eta_{\text{с}} B_y Q_y = W + E_{\text{п}} + E_{\text{о}} + 0, \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{с}} = \eta_{\text{пк}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{о}}^{\text{к}} \eta_{\text{эм}} \eta_{\text{т}}^{\text{к}}$  – электрический КПД паросиловой установки в конденсационном режиме;  $E_{\text{п}} = \eta_{\text{п}}^{\text{к}} \eta_{\text{о}}^{\text{к}} \eta_{\text{эм}} Q_{\text{п}}$  – максимальная работа, которую можно получить у потребителя пара из теплоты производственного отбора;  $E_{\text{о}} = \eta_{\text{о}}^{\text{к}} \eta_{\text{о}}^{\text{к}} \eta_{\text{эм}} Q_{\text{о}}$  – максимальная работа, которую можно получить у потребителя пара из теплоты отопительного отбора;  $\eta_{\text{о}}^{\text{к}}, \eta_{\text{эм}}$  – относительно-внутренний КПД цикла и электромеханический КПД турбогенератора;  $\eta_{\text{п}}^{\text{к}}, \eta_{\text{о}}^{\text{к}}, \eta_{\text{т}}^{\text{к}}$  – термические КПД цикла Карно, Ренкина для производственного, отопительного и конденсационного потоков пара.

Из баланса эксергии (2) найдем зависимость расхода топлива от электрической и тепловых нагрузок производственного и отопительного отборов [6]

$$B_y = \frac{W}{\eta_{\text{с}} Q_y} + \frac{\eta_{\text{п}}}{\eta_{\text{с}} \eta_{\text{пк}} \eta_{\text{тр}}} \frac{Q_{\text{п}} / Q_y}{\eta_{\text{п}} \eta_{\text{о}}^{\text{к}}} + \frac{\eta_{\text{о}}}{\eta_{\text{с}} \eta_{\text{пк}} \eta_{\text{тр}}} \frac{Q_{\text{о}} / Q_y}{\eta_{\text{о}} \eta_{\text{о}}^{\text{к}}} = b_3 W_3 + b_{\text{п}} Q_{\text{п}} + b_{\text{о}} Q_{\text{о}}. \quad (3)$$

Расчетные зависимости для удельных расходов условного топлива, определяющие тепловую экономичность комбинированной установки по выработке электроэнергии, производственного пара и горячей сетевой воды составляют:

$$b_3 = \frac{0,123}{\eta_{\text{с}}}, \text{ кг у. т./}(кВт \cdot \text{ч}); \quad b_{\text{п}} = \frac{34,1}{\psi_{\text{п}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{пк}}}, \text{ кг у. т./ГДж};$$

$$b_{\text{о}} = \frac{34,1}{\psi_{\text{о}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{пк}}}, \text{ кг у. т./ГДж}, \quad (4)$$

где  $\psi_{\text{п}}$  и  $\psi_{\text{о}}$  – коэффициенты трансформации теплоты свежего пара в теплоту отборного [7],

$$\psi_{\text{п}} = \frac{\eta_{\text{т}}^{\text{к}}}{\eta_{\text{п}}} = \frac{1 - T_{\text{к}}/T}{1 - T_{\text{к}}/T_{\text{п}}}; \quad \psi_{\text{о}} = \frac{\eta_{\text{т}}^{\text{к}}}{\eta_{\text{о}}} = \frac{1 - T_{\text{к}}/T}{1 - T_{\text{к}}/T_{\text{о}}}, \quad (5)$$

где  $T, T_{\text{п}}, T_{\text{о}}, T_{\text{к}}$  – абсолютная температура насыщения пара в паровом котле, производственном и отопительном отборах, в конденсаторе паровой турбины, К.

Обратимая трансформация теплоты свежего пара в теплоту отборного является источником экономии топлива на ТЭЦ по сравнению с получением пара в котельной за счет теплоты продуктов сгорания топлива.

Вычислим удельные расходы условного топлива брутто на ТЭЦ с турбоустановками ПТ-50-130/13, начальные параметры пара: давление – 13,0 МПа, температура составляет 565 °С:

- на выработку электроэнергии

$$b_3 = \frac{0,123}{\eta_{\text{нк}} \eta_{\text{тр}} \eta_l^k \eta_l^r \eta_{\text{эм}}} = \frac{0,123}{0,9 \cdot 0,97 \cdot 0,51 \cdot 0,8 \cdot 0,97} = 0,356, \text{ кг у. т./}(\text{кВт} \cdot \text{ч}); \quad (6)$$

- на выработку теплоты, отпущенной с технологическим паром в производственном отборе, давление – 1,3 МПа:

$$b_n^r = \frac{34,1}{\eta_{\text{нк}} \eta_{\text{тр}} \Psi_n} = \frac{34,1}{0,9 \cdot 0,97 \cdot 1,43} = 27,3, \text{ кг у. т./ГДж}; \quad (7)$$

- на получение теплоты, отпущенной с паром в отопительном отборе, давление – 0,12 МПа:

$$b_o^r = \frac{34,1}{\eta_{\text{нк}} \eta_{\text{тр}} \Psi_o} = \frac{34,1}{0,9 \cdot 0,97 \cdot 2,43} = 16,1, \text{ кг у. т./ГДж}. \quad (8)$$

С учетом паровых эквивалентов теплоты для производственного и отопительного отборов ( $p_p = 0,382$  т/ГДж и  $p_o = 0,444$  т/ГДж) удельные расходы условного топлива на выработку пара в производственном и отопительном отборах равны:

$$b_n = b_n^r / p_p = 27,3 / 0,382 = 71,6;$$

$$b_o = b_o^r / p_o = 16,1 / 0,444 = 36,2. \quad (9)$$

С целью подтверждения полученных величин удельных расходов (6), (9) определим их для паротурбинной установки марки ПТ-50-130/13 по техническим данным [8]. Запишем и решим систему уравнений  $D = f(N, D_n, D_o)$  для нагрузок в номинальном режиме, конденсационном режиме и в режимах с максимальными производственным и отопительным отборами, откуда получим паровую характеристику турбоустановки:

$$D^{\text{бп}} = 10 + 3,6N + 0,73D_n + 0,35D_o; \quad (10)$$

$$N = 0,14D_n + 0,243D_o + 0,34D_k,$$

где  $D^{\text{бп}}$  – общий расход свежего пара на турбину, т/ч;  $D_n, D_o$  – расход пара из производственного и отопительного отборов, т/ч;  $D_k$  – расход пара в конденсатор, т/ч.

Из теплового баланса системы «котел – турбина» найдем связь расхода условного топлива в паровом котле и потребления пара турбинами ТЭЦ с начальным давлением 14 МПа

$$\frac{B_y}{D} = \frac{(1 + \sum \alpha) \Delta t}{\eta_{\text{нк}} Q_y} = \frac{1,05 \cdot 601 \cdot 4,18}{0,9 \cdot 7000 \cdot 4,18} = 0,10, \quad (11)$$

где  $\sum \alpha$  – доля потерь производительности паровых котлов с расходом

пара на собственные нужды от утечек и продувки;  $\Delta i$  – расход теплоты в котле на получение перегретого пара из питательной воды, кДж/кг.

Расход условного топлива в котельной ТЭЦ при выработке электроэнергии  $W$ , МВт · ч, и отпуске пара из отборов в количестве  $D_n, D_o$ , т/ч, составит в течение 1 ч

$$B_y = 0,1D = 1,0\tau + 0,36W + 0,071D_n + 0,035D_o, \text{ т у. т.} \quad (12)$$

Здесь коэффициенты  $b_s = 0,36 \text{ т у. т.}/(\text{МВт} \cdot \text{ч})$ ;  $b_n = 0,071 \text{ т у. т.}/\text{т}$ ;  $b_o = 0,035 \text{ т у. т.}/\text{т}$  представляют удельные расходы условного топлива на выработку продукции,  $b_x = 1 \text{ т у. т.}/\text{ч}$  – расход условного топлива турбоустановкой на холостом ходу;  $\tau$  – число часов холостого хода.

Коэффициенты топливной характеристики ТЭЦ (3), найденные по техническим данным турбоустановки, аналогичны по смыслу и совпадают по величине с удельными расходами топлива, вычисленными по формулам (6)–(9), исходя из термодинамических параметров цикла, а значит, они объективно отражают тепловую экономичность установки.

Эксплуатационные удельные расходы топлива нетто легко вычислить с учетом расхода энергии на собственные нужды и потерь в цикле станции. Топливная характеристика ТЭЦ с турбоустановками разных марок может быть получена на основе сложения паровых характеристик турбин с учетом их «удельного веса» [9].

С экономической точки зрения, общим для КЭС и ТЭЦ показателем эффективности производственной деятельности по преобразованию теплоты продуктов сгорания топлива в эксергию может служить удельная себестоимость производства энергии  $c$ , равная отношению годовых издержек производства  $I$  к годовому расходу условного топлива  $B_y$ :

$$c = I/B_y = c_\tau + I'/B_y, \text{ руб/т у. т.}, \quad (13)$$

где  $I'$  – постоянная составляющая годовых издержек.

Величина удельной себестоимости производства энергии на 50–75 % определяется стоимостью топлива  $c_\tau$ .

Удельная себестоимость энергоносителей, отпущенных с шин и коллекторов ТЭЦ, пропорциональна удельному расходу условного топлива и будет равна:

$$\begin{array}{ll} \text{электроэнергии} & c_3 = b_3 c, \text{ руб}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}); \\ \text{теплоты промотбора} & c_n = b_n c, \text{ руб}/\text{ГДж}; \\ \text{теплоты отопительного отбора} & c_o = b_o c, \text{ руб}/\text{ГДж}. \end{array} \quad (14)$$

При разделении вопросов определения показателей тепловой экономичности и определения тарифов последняя задача легко решается экономическими методами из условия рентабельности ТЭЦ. Например, в Германии, Дании и Франции [10] по фиксированной цене на электроэнергию вычисляют выручку от ее продажи, затем выручку вычитают из издержек общего производства и остаток относят на производство тепловой энергии.

Тарифы на продукцию ТЭЦ должны обеспечить компенсацию затрат производителя и получение прибыли, быть конкурентными, т. е.

$$T_3 W + T_n Q_n + T_o Q_o = I(1 + p), \quad (15)$$

где  $p$  – уровень рентабельности.

Цена электроэнергии на рынке энергоресурсов  $T_3^p$  определяется ее тарифом у самого дешевого оптового производителя. Тариф на теплоту из производственного отбора найдем из соотношения  $T_n/T_T = c_n/c_T = b_n/b_T$ . Тариф на теплоту, отпущенную с сетевой водой, найдем по остаточному принципу [11] из выражения

$$T_T = \frac{(1+p)И - T_3^p W}{Q_n b_n / b_T + Q_T}. \quad (16)$$

Рассмотрим методику и пример расчета показателей эффективности ТЭЦ на основе термодинамического подхода.

**Исходные данные.** На городской ТЭЦ с четырьмя турбогенераторами Т-100-130 планируется годовая выработка теплоты в отопительных отборах  $Q_{от} = 16,7 \cdot 10^6$  ГДж ( $4 \cdot 10^6$  Гкал), пиковыми водогрейными котлами  $Q_{вк} = 4,18 \cdot 10^6$  ГДж ( $1 \cdot 10^6$  Гкал) при трех вариантах отпуска электроэнергии  $W = 1,5; 2; 2,5 \cdot 10^6$  МВт · ч. Стоимость топлива  $c_T = 1000$  руб/т у. т., стоимость электроэнергии на оптовом рынке  $c_3 = 0,5$  руб/(кВт · ч), постоянная составляющая годовых издержек  $И' = 0,7 \cdot 10^9$  руб.

**Расчет удельных расходов топлива, себестоимости продукции и тарифов для ТЭЦ.** По техническим данным турбоустановки Т-100-130 [8] найдем ее паровую характеристику

$$D = 3,6N^{6p} + 0,274D_0^{6p} = 3,6N^{6p} + 0,51 Q_0^{6p}, \quad \text{т/ч}, \quad (17)$$

где  $D$  – расход пара на турбины, т/ч;  $N^{6p}$  – электрическая мощность турбин, МВт;  $D_0^{6p}$  – отпуск пара из отопительного отбора, т/ч.

Преобразуем паровую характеристику в топливную. Из условия  $B_y = 0,1D$  получим

$$B_y = 0,36 W_9^{6p} + 0,051 Q_0^{6p}. \quad (18)$$

С учетом расхода 11 % электроэнергии, 18 % тепловой энергии на собственные нужды ТЭЦ при расходе топлива на пиковые водогрейные котлы  $B_{пк} = 0,16Q_{пк}$  топливная характеристика примет вид

$$\begin{aligned} B_y &= 0,4W^H + 0,06Q_{от} + 0,16Q_{пк} = \\ &= 0,4W^H + \frac{0,06 \cdot 4 + 0,16 \cdot 1}{5}(Q_{от} + Q_{пк}) = 0,4W^H + 0,08(Q_{от} + Q_{пк}). \end{aligned} \quad (19)$$

Из топливной характеристики ТЭЦ следует, что удельные расходы условного топлива нетто составляют  $b_3^H = 0,4$  кг у. т. / (кВт · ч);  $b_4^T = 19,1$  кг у. т. / ГДж (80 кг у. т. / Гкал). Дальнейший расчет показателей приведен в табл. 1.

Как видно из расчета, удельная себестоимость производства энергии с, руб/т у. т., является главным показателем, определяющим как себестоимость энергии, так и величину прибыли и тарифов. Удельная себестоимость производства энергии снижается с ростом тепловой и электрической нагрузок ТЭЦ. Увеличение конденсационной выработки электроэнергии

на ТЭЦ выгодно как ее производителю (снижается себестоимость продукции, растет прибыль), так и потребителю теплоты (снижается величина ее тарифа).

Таблица 1

Расчет экономических показателей ТЭЦ

№ п/п	Показатель	Размерность	Отпуск электроэнергии $W_9^H \cdot 10^{-6}$ МВт · ч		
			1,5	2	2,5
1	Расход условного топлива $B_y = 0,4W^H + 0,08(Q_{от} + Q_{пк})$	$\times 10^6$ т у. т.	1	1,2	1,4
2	Себестоимость производства энергии $c = c_t + I'/B_y$	руб/кг у. т.	1,70	1,58	1,3
3	Себестоимость производства электроэнергии $c_3 = b_3c$	руб/(кВт · ч)	0,68	0,632	0,6
4	Себестоимость производства теплоты $c_m = b_m c$	руб/ГДж	32,5	30,1	28,7
5	Общие годовые издержки производства И = cB	млрд руб	1,7	1,84	2,1
6	Прибыль $\Pi = 0,1И$	млрд руб	0,17	0,184	0,21
7	Необходимый доход предприятия $D = 1,1И = И + \Pi$	млрд руб	1,87	2,02	2,31
8	Рыночный тариф на электроэнергию $T_9^p$	руб/(кВт · ч)	0,5	0,5	0,5
9	Тариф на отпущенную теплоту $T_m$	руб/ГДж	53,5	51,6	50,6

При этом интересы городских ТЭЦ и АО «Генерация» вступают в противоречие с интересами мощных ГРЭС, вынужденных либо сокращать выработку и объем продажи электроэнергии на федеральном оптовом рынке, либо снижать ее стоимость. Таким образом, конкуренция городских ТЭЦ и районных КЭС будет служить естественным регулятором тарифов на электроэнергию.

## ВЫВОДЫ

1. Топливная характеристика ТЭЦ является объективным показателем тепловой экономичности энергоустановки. Ее просто определить как при планировании работы, так и по результатам производственной деятельности ТЭЦ.

2. Величины удельных расходов условного топлива на выработку теплоты и электроэнергии в комбинированной электроустановке, вычисленные на основе термодинамического анализа цикла Ренкина или эксергетического баланса турбоустановки, а также по справочным техническим данным паровой турбины, идентичны.

3. Необходимо отказаться от условных показателей тепловой и экономической эффективности ТЭЦ в пользу простых и термодинамически строгих.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Р е ш е н и е научно-практической конференции специалистов ФЭК России, РАО «ЕЭС России», АО-Энерго по теме «Вопросы формирования тарифов на электрическую тепловую энергию, производимую на ТЭЦ». – Жаворонки Моск. обл., 28–30 марта 2000.
2. П и и р, А. Э. Эффективность выработки тепла и электроэнергии на ТЭЦ / А. Э. Пиир, В. Б. Кунтыш // Энергетика... (Изв. вузов). – 1976. – № 12. – С. 127–131.
3. Ф о р м и р о в а н и е тарифов на ТЭЦ в рыночных условиях / В. А. Малофеев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2003. – № 4. – С. 55–63.
4. П и и р, А. Э. Термодинамические закономерности производства тепла и работы в комбинированной установке / А. Э. Пиир, В. Б. Кунтыш // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. тр. / СПб. ГТУРП. – 1995. – Ч. 2 – С. 37–44.
5. Г о х ш т е й н, Д. П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок / Д. П. Гохштейн. – М.: Энергия, 1969. – 367 с.
6. П и и р, А. Э. Термодинамические основы трансформации теплоты на ТЭЦ / А. Э. Пиир, В. Б. Кунтыш // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 1. – С. 65–72.
7. Г л а д у н ц о в, А. И. По поводу энергетического обеспечения действующего способа распределения расхода тепла на ТЭЦ / А. И. Гладунцов, Ю. В. Пустовалов // Теплоэнергетика. – 1989. – № 2. – С. 52–53.
8. Ш л я х и н, П. Н. Краткий справочник по паротурбинным установкам / П. Н. Шляхин, М. Л. Бершадский. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 128 с.
9. П и и р, А. Э. Топливная характеристика ТЭЦ как показатель эффективности ее работы. Совершенствование энергетических систем и технологического оборудования: сб. науч. тр. / А. Э. Пиир, В. Б. Кунтыш. – Архангельск, 2002. – С. 130–132.
10. С р а в н и т е л ь н а я оценка отечественных и зарубежных методов разделения расхода топлива и формирование тарифов на ТЭЦ / Л. С. Хрилев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2003. – № 4. – С. 45–54.
11. П и и р, А. Э. Оценка эффективности ТЭЦ без разделения расхода топлива по видам продукции / А. Э. Пиир, В. Б. Кунтыш // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 1. – С. 64–69.

Представлена кафедрой  
промышленной теплоэнергетики АГТУ

Поступила 14.02.2006

УДК 669.27:519

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЯВНОЙ ЧИСЛЕННОЙ СХЕМЫ ТРЕХМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

**Докт. физ.-мат. наук, проф. ЧИЧКО А. Н., асп. БОРОЗДИН А. С.**

*Белорусский национальный технический университет*

Одной из важнейших задач в технологии термической обработки является выбор режимов нагрева заготовок [1]. В настоящее время использование численных методов при расчете режимов нагрева практически не проводится из-за отсутствия специальных программных средств на предприятиях. Для расчета температурных полей для заготовок простой формы