

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 $\eta_{\text{с}} = \eta_{\text{пк}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{о}} \eta_{\text{эм}} \eta_{\text{т}}^R$ – электрический КПД паросиловой установки в конденсационном режиме; $E_{\text{п}} = \eta_{\text{п}}^{\text{к}} \eta_{\text{о}} \eta_{\text{эм}} Q_{\text{п}}$ – максимальная работа, которую можно получить у потребителя пара из теплоты производственного отбора; $E_{\text{о}} = \eta_{\text{о}}^{\text{к}} \eta_{\text{о}} \eta_{\text{эм}} Q_{\text{о}}$ – 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; $\eta_{\text{п}}^{\text{к}}, \eta_{\text{о}}^{\text{к}}, \eta_{\text{т}}^R$ – 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]

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

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],

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

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

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

- 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; Δi – 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 $b_s = 0,36$ т у. т./ (МВт · ч); $b_n = 0,071$ т у. т./т; $b_o = 0,035$ т у. т./т представляют удельные расходы условного топлива на выработку продукции, $b_x = 1$ т у. т./ч – расход условного топлива турбоустановкой на холостом ходу; τ – 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_τ .

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

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

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 $T_n/T_r = c_n/c_r = b_n/b_r$. Тариф на теплоту, отпущенную с сетевой водой, найдем по остаточному принципу [11] из выражения

$$T_r = \frac{(1+p)И - T_3^p W}{Q_n b_n / b_r + Q_r}. \quad (16)$$

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 $c_r = 1000$ 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