

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛОТЫ НА ТЭЦ

Канд. техн. наук, доц. ПИИР А. Э.,  
докт. техн. наук, проф. КУНТЫШ В. Б.

*Архангельский государственный технический университет,  
Белорусский государственный технологический университет*

Рациональная техническая политика в области энергетики должна базироваться на объективных термодинамических, а не конъюнктурных показателях, учитывать действительные затраты топлива на получение продукции и стимулировать потребителей теплоты к использованию более дешевых теплоносителей с низкими параметрами [1–4].

До 1996 г. в энергетике России применялся условный физический метод распределения расхода топлива, сжигаемого на ТЭЦ, на выработку электроэнергии, пара и горячей воды [5–6]. Этот метод создавал иллюзию высокого технического совершенства тепловых электростанций СССР, а с переходом к рыночным отношениям нанес серьезный вред энергетическому хозяйству, сделав ТЭЦ неконкурентными индивидуальным котельным, сооружение которых приняло массовый характер при незагруженных теплофикационных мощностях станций.

Среди работников энергетических предприятий и специалистов бытует мнение о сложности эксергетического метода расчета, требующего использования специальных приемов, таблиц и диаграмм. Сторонники физического метода [9] совершенно справедливо упрекают своих оппонентов в отсутствии теоретически обоснованной методики исчисления удельных расходов на отпущенные потребителям теплоту и электроэнергию. В действительности же, как можно увидеть ниже, показатели комбинированного процесса ТЭЦ имеют ясный термодинамический смысл, предельно простую методику вычисления, а для своего описания не требуют таких понятий, как эксергия, анергия и коэффициент ценности теплоты. Эксергетические по сути удельные расходы пара на выработку электроэнергии и теплоты уже свыше 60 лет используются для вычисления паровой нагрузки теплофикационных турбин и заложены в диаграммы режимов паровых турбин марок Т и ПТ.

Рассмотрим показатели и закономерности, характеризующие преобразование энергии в конденсационном и теплофикационном (противодавленческом) режимах работы паротурбинной установки. В конденсационном режиме работы по идеальному регенеративному циклу Ренкина 1346 (рис. 1) с термическим КПД  $\eta_k$  подведенная от продуктов сгорания топлива к рабочему телу теплота высокого потенциала  $Q_1$  частично превращается в работу  $W_k$ . Остальная непревратимая часть  $Q_2$  с потенциалом  $T_0$  отводится в окружающую среду согласно балансу

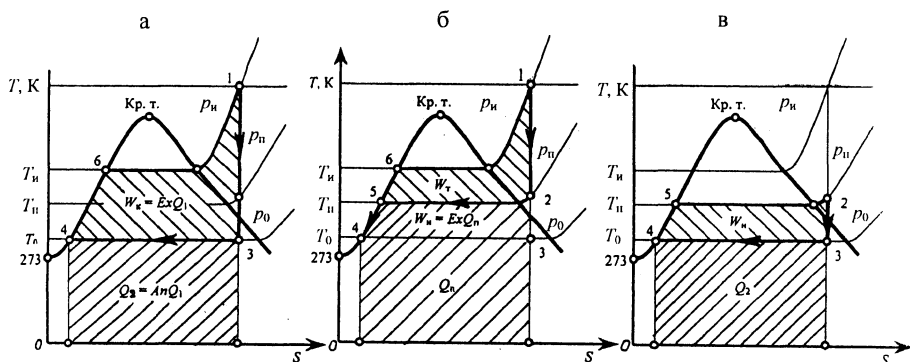


Рис. 1. Идеальные термодинамические циклы Ренкина для потоков пара: а – конденсационного; б – теплофикационного; в – отводимого из турбины;  $ExQ_1$ ,  $AnQ_1$  – эксергия и анергия свежего пара;  $ExQ_n$  – эксергия пара, отпущенного из отбора;  $W_k$ ,  $W_n$  – работа конденсационного и теплофикационного потоков пара;  $W_n$  – недовыработка теплофикационного потока пара

$$Q_1 = W_k + Q_2; W_k = \eta_k Q_1. \quad (1)$$

Важно подчеркнуть, что переданная окружающей среде теплота  $Q_2$  не является потерей, как считают сторонники физического метода [6], а представляет собой тепловые отходы, не имеющие практической ценности. Поскольку температура окружающей среды  $T_0$  фиксирована, удельный расход теплоты на получение работы в конденсационном режиме зависит только от начальных параметров цикла Ренкина. Его величина всегда больше единицы, что следует из соотношения

$$q_k = Q_1/W_k = 1/\eta_k. \quad (2)$$

В теплофикационном режиме работы турбоустановки по идеальному регенеративному циклу Ренкина 1256 (рис. 1) с противодавлением  $p_n$  и термическим КПД  $\eta_t$  из подведенной теплоты  $Q_1$  часть теплоты, равная  $Q_{1т}$ , затрачивается на работу  $W_t$ , а оставшаяся часть  $Q_{1п}$  трансформируется в теплоту  $Q_n$  требуемого потенциала  $T_n$  и передается потребителю. Запишем энергетические балансы теплофикационной установки:

$$Q_1 = Q_{1т} + Q_{1п} = W_t + Q_n; W_t = \eta_t Q_1; Q_n = (1 - \eta_t) Q_1. \quad (3)$$

Выработка энергии  $W_t$  и выработка теплоты  $Q_n$  в противодавленческом режиме жестко связаны между собой. Доля выработки энергии на тепловом потреблении  $\mathcal{E}_t$  зависит от начальных параметров и давления пара  $p_n$  в теплофикационном отборе

$$\mathcal{E}_t = W_t/Q_n = \eta_t/(1 - \eta_t). \quad (4)$$

Затратив одно и то же количество теплоты  $Q_1$ , можно получить в конденсационном режиме работу  $W_k$  или в теплофикационном режиме – рабо-

ту  $W_T$  плюс теплоту  $Q_n$ . Следовательно, на получение работы  $W_H = W_K - W_T$  в конденсационном режиме расходуется такая же доля теплоты  $Q_1$ , как в теплофикационном режиме на выработку теплоты  $Q_n$ , а именно

$$Q_{1n} = \frac{W_H}{\eta_k} = \frac{W_H}{W_K/Q_1} = \frac{W_H}{W_K} Q_1. \quad (5)$$

Вычислим теплоту, затраченную на получение работы в теплофикационном режиме:

$$Q_{1T} = \frac{W_T}{W_K} Q_1 = q_k W_T. \quad (6)$$

Заметим, что теплота, переданная потребителям, и теплота, затраченная в источнике, не равны между собой, а работа также не равна теплоте, затраченной на ее получение, как это принято в физическом методе. В действительности  $Q_n > Q_{1n}$ , а  $Q_{1T} > W_T$ .

В идеальном регенеративном цикле Ренкина 2345 (рис.1), термический КПД которого  $\eta_n$ , из отпущенной потребителю теплоты  $Q_n$  была бы получена работа  $W_H$ , согласно соотношениям:

$$W_H = \eta_n Q_n; \quad Q_n = W_H + Q_2. \quad (7)$$

С теплотой  $Q_n$  потребителю передается эксергия  $Ex_n = \eta_n Q_n$ , равная недовыработке  $W_H$  в турбине, поскольку температура конденсации отработавшего пара равняется температуре окружающей среды.

После подстановки работы  $W_H$  из (7) в (5) получим формулу для расчета расхода теплоты высокого потенциала на теплоснабжение потребителей

$$Q_{1n} = \eta_n Q_n / \eta_k = q_n Q_n. \quad (8)$$

Величина удельного расхода теплоты высокого потенциала  $q_n$  на выработку теплоты низкого потенциала  $T_n$  меньше единицы и в пределе изменяется от 1 до 0 при снижении давления в теплофикационном отборе от  $p_n$  до  $p_0$

$$q_n = \eta_n q_k = \eta_n / \eta_k = 1/\psi. \quad (9)$$

Отношение отпущенной потребителю к затраченной теплоте представляет коэффициент трансформации теплоты высокого потенциала  $T_n$  в теплоту более низкого потенциала  $T_H$

$$\psi = \frac{Q_n}{Q_{1n}} = \frac{1}{q_n} = \frac{\eta_k}{\eta_n} \approx \frac{1 - T_0/T_H}{1 - T_0/T_n}. \quad (10)$$

Таким образом, теплофикационный цикл Ренкина служит понизительным термотрансформатором, который действует за счет источника теплоты высокого потенциала и совершает при этом полезную работу [3].

В балансе теплоты по формуле (8) сторонники физического метода [6, 9] видят мнимое нарушение первого начала термодинамики. В действительности же источником теплоты для потребителя является теплофикационный отбор паровой турбины, для которого справедливы балансы теплоты по формуле (7).

Сравним удельные расходы теплоты на получение работы в теплофикационном и конденсационном режимах. Преобразуем (5):

$$\frac{W_n}{W_k} = \frac{Q_{1п}}{Q_1}; \quad \frac{W_k - W_T}{W_k} = \frac{Q_1 - Q_{1Т}}{Q_1}; \quad \frac{Q_{1Т}}{W_T} = \frac{Q_1}{W_k} = \frac{1}{\eta_k} = q_k. \quad (11)$$

Из (11) следует, что удельный расход теплоты высокого потенциала на получение работы одинаков при конденсационном и теплофикационном режимах работы паротурбинной установки, в цилиндре низкого или высокого давления турбины, и характеризуется во всех случаях термическим КПД цикла Ренкина  $\eta_k$ , определяемого средней температурой подвода теплоты  $T_n$ , несмотря на то, что термический КПД цикла Ренкина, рассчитанный для теплофикационного потока пара меньше, чем термический КПД цикла Ренкина для конденсационного потока. Это объясняется тем, что в первом случае для получения работы используется теплота  $Q_1$  полностью, а во втором – только ее часть  $Q_{1Т}$ .

Эффективность превращения теплоты высокого потенциала в работу не зависит от того, где заканчивается процесс расширения пара – в конденсаторе или сетевом подогревателе, только в последнем случае соответствующее количество теплоты  $Q_2 = W_T(1/\eta_T - 1)$  передается в окружающую среду после использования  $Q_n$  у теплового потребителя.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов, характеризующих идеальные циклы Ренкина теплофикационной установки при различном конечном давлении пара  $p_n$ .

Таблица 1

**Показатели идеального цикла Ренкина теплофикационной установки при различном конечном давлении пара  $p_n$  ( $p_n = 13$  МПа;  $t_1 = 565$  °С;  $T_0 = 298$  К;  $T_n = 608$  К;  $\eta_k = 0,51$ )**

$p_n$ , МПа	$t'_n$ , °С	$T_n$ , К	$\eta_T$	$\eta_n$	$\Xi_T$	$q_k$	$q_n$	$\Psi$
1,6	200	473	0,22	0,37	0,285	1,96	0,72	1,36
1,3	191	463	0,24	0,35	0,315	1,96	0,70	1,43
0,5	151	424	0,30	0,30	0,434	1,96	0,59	1,67
0,12	104	377	0,38	0,21	0,612	1,96	0,41	2,43
0,03	68	341	0,44	0,13	0,783	1,96	0,25	3,92
0,0032	25	298	0,51	0,00	–	1,96	0,00	–

Чем ниже давление пара у потребителя, тем выше коэффициент трансформации теплоты  $\psi$ , больше выработка энергии на тепловом потреблении  $\mathcal{E}_T$  и тем меньше удельный расход теплоты высокого потенциала на получение теплоты низкого потенциала  $q_n$ .

Согласно выражению

$$Q_1 = q_k W + q_n Q_n = \frac{W}{\eta_k} + \frac{\eta_n}{\eta_k} Q_n = \frac{W + E_{x_n}}{\eta_k}, \quad (12)$$

комбинированная установка вырабатывает эксергию и отпускает ее потребителям в форме электроэнергии  $W$  и с теплотой низкого потенциала  $Q_n$ , ценность которой определяется количеством эксергии  $E_n$ .

Это положение очевидно, если пар из производственного отбора турбины используется для получения механической работы в молоте, насосе, компрессоре или воздуходувке, но вызывает возражения даже у специалистов [8], когда теплота используется в технологическом процессе для нагрева материалов и видимого преобразования ее в работу не наблюдается.

При этом часть эксергии пара теряется от необратимости теплообмена, который протекает тем интенсивнее, чем выше потеря, а оставшая часть затрачивается на совершение работы выхода и увеличения объема вторичного пара (в процессе сушки, выпарки, ректификации) или изменения химического потенциала при химических преобразованиях материала.

При нагреве сетевой воды эта часть эксергии передается теплоносителю, полезные потребительские свойства которого тем выше, чем выше его температура.

Таким образом, эксергия теплоты является универсальным термодинамическим показателем ее качества независимо от того, как используется у потребителя пар из отборов турбины: для получения механической работы, для совершения работы в физическом либо химическом процессе или для улучшения потребительских свойств теплоносителя.

Зная удельные расходы теплоты, из выражений (8) и (11) находим общий расход теплоты в теплофикационном цикле Ренкина как сумму расходов на получение  $W$  и  $Q_n$

$$Q_1 = \frac{W}{\eta_k} + \frac{Q_n}{\psi} = \left( \frac{\eta_T/\eta_k + \eta_n}{1 - \eta_T} + \frac{\eta_n}{\eta_k} \right) Q_n = \left( \frac{\mathcal{E}_T}{\eta_k} + \frac{1}{\psi} \right) Q_n. \quad (13)$$

Для получения той же работы  $W_T$  на КЭС с КПД цикла Ренкина  $\eta_{КЭС} > \eta_k$  и того же количества теплоты  $Q_n$  в котельной с коэффициентом трансформации теплоты  $\psi = 1$  общий расход теплоты составит

$$Q_1^p = \frac{W_T}{\eta_{КЭС}} + Q_n. \quad (14)$$

Расчеты по формулам (13) и (14) показывают, что теоретический расход топлива на ТЭЦ для получения горячей воды в 2,5...3 раза меньше, чем в котельной, а на получение технологического пара в 1,3...1,7 раза меньше, чем в котельной, благодаря обратимой трансформации теплоты. Выработка электроэнергии на ТЭЦ по сравнению с КЭС при одинаковых начальных параметрах не дает экономии топлива, а при более высоких начальных параметрах пара на КЭС связана с перерасходом топлива на 10...30 %. Общая экономия теплоты в идеальных установках при комбинированной выработке по сравнению с отдельной будет равна разности экономии, полученной при выработке теплоты  $Q_n$ , и перерасхода, полученного при выработке энергии  $W_T$  на ТЭЦ с более низкими начальными параметрами пара, нежели на КЭС:

$$\Delta Q_1 = Q_1^p - Q_1 = Q_n(1 - 1/\psi) - W_T(1/\eta_k - 1/\eta_{КЭС}). \quad (15)$$

Поскольку  $W_T = f(Q_n)$ , величина экономии определяется теплотреблением  $Q_n$ , начальными параметрами цикла и потенциалом отпускаемой теплоты согласно выражению

$$\Delta Q_1 = Q_n \left[ (1 - \eta_n/\eta_k) - (1/\eta_k - 1/\eta_{КЭС})\eta_T / (1 - \eta_T) \right]. \quad (16)$$

Долю сэкономленного топлива при комбинированной выработке по сравнению с отдельной найдем после подстановки в (16) выражения для  $Q_n$  из (3)

$$\Delta B_1/B_1 = \Delta Q_1/Q_1 = (1 - \eta_T)(1 - 1/\psi) - \eta_T(1/\eta_k - 1/\eta_{КЭС}). \quad (17)$$

Теоретическая величина экономии топлива на ТЭЦ может превышать 25 %. Этот фактор (а не тот или иной метод распределения) является стимулом развития теплофикации. Метод определения затрат топлива влияет через тарифы на политику капиталовложений в рыночных условиях, а, значит, ошибки в методике поведут к ошибочным решениям в экономике и, в конечном счете, к перерасходу энергоресурсов и финансовым потерям.

Таким образом, для расчета затрат теплоты высокого потенциала на получение работы и теплоты низкого потенциала в теплофикационной установке достаточно знать среднюю температуру подведенной теплоты в источнике  $T_n$ , температуры отпущенной теплоты  $T_n$ , окружающей среды  $T_0$  и вычислить термические КПД регенеративного цикла Ренкина  $\eta_k$ ,  $\eta_T$ ,  $\eta_n$  по этим температурам.

Для иллюстрации практического значения приведенных соотношений рассчитаем удельные расходы условного топлива для энергоустановки с паровой турбиной ПТ-50-130/13.

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, кг/кВт·ч:

$$b_3 = \frac{0,123}{\eta_{пк} \eta_{тр} \eta_k \eta_i \eta_{эм}} = \frac{0,123}{0,9 \cdot 0,97 \cdot 0,51 \cdot 0,8 \cdot 0,97} = 0,356. \quad (18)$$

Здесь  $\eta_{пк}, \eta_{тр}, \eta_k, \eta_i, \eta_{эм}$  – КПД парового котла, паропроводов, идеального цикла Ренкина, внутренний КПД цикла, электромеханический турбогенератора.

Удельный расход топлива на выработку технологического пара давлением 1,3 МПа в производственном отборе, кг/т:

$$b_{п} = \frac{143}{\psi_k \eta_{пк} \eta_{тр} c_{п}} = \frac{143}{1,43 \cdot 0,9 \cdot 1,6 \cdot 0,97} = 71,6. \quad (19)$$

Удельный расход условного топлива на выработку пара давлением 0,12 МПа в отопительном отборе, кг/т:

$$b_{т} = \frac{143}{\psi_{т} \eta_{пк} \eta_{тр} c_{т}} = \frac{143}{2,43 \cdot 0,9 \cdot 1,86 \cdot 0,97} = 36,1. \quad (20)$$

Здесь  $\psi_k, \psi_{т}$  – коэффициенты трансформации теплоты из табл. 1;  $c_{п}, c_{т}$  – паровые эквиваленты теплоты, т/Гкал.

Для проверки полученных значений удельных расходов воспользуемся топливной характеристикой турбоустановки ПТ-50-130/13.

По техническим данным о расходе свежего пара и нагрузке турбины в номинальном режиме, конденсационном режиме и в режимах с максимальными отборами пара в производственном  $D_{п}$  и теплофикационном  $D_{т}$  отборах [7] найдем удельные расходы свежего пара на холостом ходу, выработку электроэнергии и отпуск теплоты из отборов:  $d_x = 10$  т/ч;  $d_3 = 3,6$  т/МВт;  $d_{п} = 0,71$  т/т;  $d_{т} = 0,35$  т/т и запишем паровую характеристику, т/ч:

$$D = 10 + 3,6W + 0,71D_{п} + 0,35D_{т}. \quad (21)$$

С учетом соотношения между расходом условного топлива в котельной и паровой нагрузкой турбины, т/ч:

$$B = (1 + \sum \alpha) D \Delta i / (Q_n^p \eta_{пк}) = \frac{1,05}{0,9} \cdot \frac{601}{7000} D = 0,1D,$$

где  $\sum \alpha$  – доля потерь пара на собственные нужды, утечки и т. д.;  $\Delta i$  – расход теплоты на получение пара в котле, ккал/кг;  $Q_n^p$  – теплота сгорания условного топлива, ккал/кг, топливная характеристика энергоустановки с турбинами ПТ-50-130/13 примет вид, т у. т./ч:

$$B = 1 + 3,6W + 0,071D_n + 0,035D_r. \quad (22)$$

Коэффициенты этой характеристики представляют номинальные удельные расходы условного топлива, т/ч на МВт·ч электроэнергии и тонну отпущенного из отборов пара.

Их величина хорошо согласуется со значениями удельных расходов, вычисленными по формулам (18)–(20), а расхождение находится в пределах точности обоих способов расчета.

Таким образом, традиционные термодинамические (18)–(20) и теплотехнические (21), (22) показатели паротурбинной установки позволяют объективно оценить и сравнительно просто рассчитать эффективность выработки теплоты и электроэнергии в комбинированном производстве и на этой базе построить справедливую систему тарифов, стимулирующую экономию энергоресурсов и обеспечивающую рациональное развитие энергетики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов В. Е., Кацнельсон Г. Г. Повышение эффективности теплофикации на базе энергетического подхода // Теплоэнергетика. – 1989. – № 2. – С. 61–63.
2. Гладунцов А. И., Пустовалов Ю. В. По поводу энергетического обоснования действующего способа распределения расхода тепла на ТЭЦ // Теплоэнергетика. – 1989. – № 2. – С. 52–53.
3. Пир А. Э., Кунтыш В. Б. Эффективность выработки тепла и электроэнергии на ТЭЦ // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1976. – № 12. – С. 127–131.
4. Пир А. Э., Кунтыш В. Б. Термодинамические закономерности производства тепла и работы в комбинированной установке // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр. / СПб. ГТУРП. – СПб., 1995. – Ч. 2. – С. 37–44.
5. Вопросы определения КПД теплоэлектростанций / Под ред. Л. В. Винтера. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 218 с.
6. Горшков А. С. Непригодность энергетического метода распределения расходов топлива на ТЭЦ // Теплоэнергетика. – 1989. – № 2. – С. 60–61.
7. Шляхин П. Н., Бершадский М. Л. Краткий справочник по паротурбинным установкам. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 128 с.
8. Сазанов Б. В., Ситас В. И. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
9. Шиман С. Е. О приложении эксергетического метода для анализа эффективности теплосиловых установок // Электрические станции. – 1994. – № 10. – С. 37–43.

Представлена кафедрой  
промышленной теплоэнергетики АГТУ

Поступила 28.01.2002