

ВЫВОДЫ

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) термодинамическая эффективность цикла паротурбинной установки зависит от вида используемого топлива;
- 2) величина коэффициента использования энергии топлива при прочих равных условиях больше у низкокалорийных видов топлива;
- 3) при повышении термического КПД цикла паротурбинной установки влияние качества топлива увеличивается;
- 4) при приближении к использованию топливно-кислородного источника первичной энергии эффективность цикла паротурбинной установки возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международное энергетическое агентство [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.iea.org/>. – Дата доступа: 04.07.2010.
2. Агентство РИА-Новости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ria.ru/atomtec/20120903/741744767.html>. – Дата доступа: 05.10.2012.
3. Новости компании Siemens AG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.siemens.by/brochures/PoF_Belarus_Autumn2008.pdf. – Дата доступа: 22.08.2009.
4. Хрустале в, Б. М. Техническая термодинамика: учеб.: в 2 ч. Ч. 1 / Б. М. Хрустале в, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск: Технопринт, 2003.
5. Хрустале в, Б. М. Техническая термодинамика: учеб.: в 2 ч. Ч. 2 / Б. М. Хрустале в, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск: Технопринт, 2004.
6. Рави ч, М. Б. Эффективность использования топлива / М. Б. Рави ч. – М.: Из-во «Наука», 1977.

Представлена кафедрой ПТЭ и Т

Поступила 10.10.2012

УДК 621.003.019

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ С РАЗЛИЧНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Доктора техн. наук, профессора ПИИР А. Э.¹⁾, КУНТЫШ В. Б.²⁾,
инж. ВЕРЕЩАГИН А. Ю.¹⁾

¹⁾Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,

²⁾Белорусский государственный технологический университет

Совместное производство тепловой и электрической энергии на крупных паротурбинных ТЭЦ экономит до 30 % часового расхода топлива по сравнению с раздельной выработкой. При одинаковом топливе это позволяет ТЭЦ успешно конкурировать на рынке электроэнергии с мощными КЭС, имеющими более высокие начальные параметры пара. Термодинамическая теория, рассматривающая комбинированное производство как обратимый термотрансформатор, и вытекающая из нее методика расчета удельных расходов топлива на ТЭЦ представлены в [1–3].

Как известно, в зарубежной практике широкое распространение получили ТЭЦ небольшой мощности (мини-ТЭЦ), где в качестве теплового двигателя используют дизельные двигатели, паровую или газовую турбину. Эффективность этих установок оценивают тремя техническими показателями: электрическим, тепловым и общим КПД, вычисленными по расходу топлива B при номинальных электрической N и тепловой Q мощности [4]:

$$\eta_e = N / (BQ_n^p); \quad \eta_t = Q / (BQ_n^p); \quad \eta_o = (Q + N) / (BQ_n^p), \quad (1)$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания рабочей массы топлива.

Очевидно, что все эти показатели условны, никак не связаны с процессом комбинированной выработки, не позволяют установить действительный расход топлива на получение теплоты и электрической энергии или вычислить реальную себестоимость продукции.

Для решения вопроса о тепловой эффективности мини-ТЭЦ рассмотрим термодинамические закономерности совместного получения работы и теплоты низкого потенциала (НП) за счет теплоты высокого потенциала (ВП) в идеальном цикле Карно. Данный способ термодинамического анализа излагается впервые.

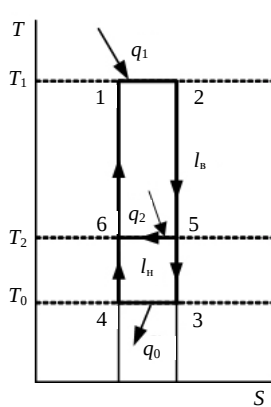


Рис. 1. Термодинамический цикл Карно комбинированной установки

Идеальный цикл Карно 1–2–3–4 (рис. 1), действующий в интервале температур T_1 и T_0 , представим как комбинированный, т. е. состоящий из верхнего цикла Карно 1–2–5–6, действующего в интервале температур T_1 и T_2 , и нижнего цикла Карно 6–5–3–4, действующего в интервале температур T_2 и T_0 .

В верхнем цикле Карно за счет теплоты ВП q_1 получают работу l_{10} и теплоту НП q_2 , служащую для получения работы l_{12} и бесполезной теплоты q_0 , отводимой в окружающую среду. При совместной выработке теплота q_2 просто передается тепловому потребителю. Определим, какая часть теплоты ВП q_1 расходуется на получение работы в верхнем цикле Карно и какая часть – на получение теплоты НП q_2 .

Запишем тепловые и энергетические балансы для комбинированного цикла Карно:

$$q_1 = l_{10} + q_0 = q_1^b + q_1^n; \quad (2)$$

$$l_{10} = q_1 \eta_{10} = l_{12} + l_{20}; \quad (3)$$

$$l_{12} = q_1 \eta_{12}; \quad q_2 = q_1 (1 - \eta_{12}); \quad (4)$$

$$\eta_{10} = 1 - T_0 / T_1; \quad \eta_{12} = 1 - T_2 / T_1; \quad \eta_{20} = 1 - T_0 / T_2, \quad (5)$$

где l_{10} , l_{12} , l_{20} – работа в цикле Карно: общая, верхнего цикла, нижнего цикла; η_{10} , η_{12} , η_{20} – термический КПД комбинированного, верхнего и нижнего циклов.

Удельный расход теплоты ВП на получение как работы l_{10} , так и составляющих ее частей l_{12} и l_{20} будет одинаковым [5] и равным

$$\bar{q}_p = q_1/l_{10} = q_1/(l_b + l_n) = q_1/(l_b + exq_2) = 1/\eta_{10} = T_0/(T_1 - T_0) > 1, \quad (6)$$

где ex – эксергия.

Это означает, что при комбинированной выработке затрата теплоты ВП на получение работы в несколько раз больше количества полученной работы, а главное, удельный расход топлива не зависит от температурной границы $T_2 \geq T_0$. В качестве подтверждения этого теоретического вывода можно сослаться на итоги исследований, выполненных еще в 1989 г. [6, 7] и установивших, что в конденсационной и теплофикационных турбоустановках марок К-300-240, Т-250-240, ПТ-140/165-240 эффективность выработки электроэнергии одинакова и составляет 320–325 г у. т./(кВт·ч), чему соответствуют КПД $\eta_s = 0,38$ и удельный расход теплоты ВП $\bar{q}_s = 2,6$.

Расход теплоты ВП на получение работы в верхнем цикле Карно

$$q_1^B = \bar{q}_p l_0 = q_1 \eta_{12} / \eta_{10}. \quad (7)$$

Остальное количество теплоты ВП в количестве

$$q_1^H = q_1 - q_1^B = q_1(1 - \eta_{12}/\eta_{10}) \quad (8)$$

трансформируется двигателем в теплоту НП q_2 , которая передается потребителю (или может быть использована в нижнем цикле Карно для получения работы l_n). Это значит, что на получение работы l_n или теплоты НП расходуется одинаковое количество теплоты ВП q_1^H .

Удельный расход теплоты ВП на получение теплоты НП в комбинированном цикле Карно составит

$$\bar{q}_r = \frac{q_1^H}{q_2} = \frac{1 - \eta_{12}/\eta_{10}}{1 - \eta_{12}} = \eta_{20} \bar{q}_p = \frac{T_1}{T_2} \frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0} < 1. \quad (9)$$

Как и следовало ожидать, количество полученной при обратимой трансформации теплоты НП в несколько раз больше количества затраченной теплоты ВП. Например, в комбинированном цикле Карно при $T_1 = 1000$ К; $T_2 = 500$ К и $T_0 = 300$ К удельные расходы теплоты ВП составят на получение работы $\bar{q}_p = 1,5$; на получение теплоты НП $\bar{q}_r = 0,6$.

Мини-ТЭЦ работают на органическом топливе, а их тепловые двигатели действуют по различным термодинамическим циклам: Ренкина, Дюбуа, Дизеля, где тепловыми двигателями служат паровая и газовая турбины, двигатель внутреннего сгорания.

Полученные формулы удельного расхода теплоты (6) и (9) применимы к ТЭЦ с двигателями любого типа, если в них реальные процессы отвода и подвода теплоты заменить на изотермические при средней термодинамической температуре. Кроме того, реальный термодинамический цикл установки следует рассматривать как верхний, дополнив его условным нижним циклом для получения работы l_n за счет теплоты НП q_2 .

Таким образом, циклу противодавленческой паротурбинной установки 1–2–3–4–5 (рис. 2а) соответствует комбинированный цикл 7–1–2–3–4–5–6 конденсационной установки, циклу газотурбинной установки 1–2–3–4

(рис. 2б) – комбинированный цикл 1–2–3–4–5, циклу дизельной установки 1–2–3–4–5 (рис. 2в) – комбинированный термодинамический цикл 1–2–3–4–5–6.

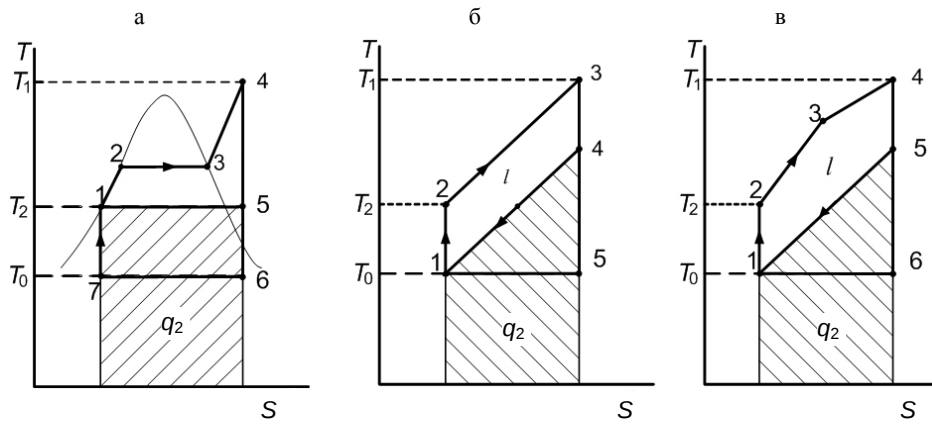


Рис. 2. Комбинированные термодинамические циклы ТЭЦ:
а, б, в – соответственно с паровым, газотурбинным и дизельным двигателем

Выразим термические КПД идеальных циклов через их среднетермодинамические температуры и запишем выражения:

- для исходного комбинированного цикла

$$\eta_k = 1 - T_0/T_{\text{ср.т}} = (N + \text{ex}Q_2)/Q_1; \quad (10)$$

- для «верхнего» цикла теплового двигателя

$$\eta_d = 1 - T_{\text{ср.т}}/T_{\text{ср.т}} = N/Q_1. \quad (11)$$

По аналогии с комбинированным циклом Карно, удельные расходы теплоты ВП на получение работы и теплоты НП на мини-ТЭЦ с любым типом теплового двигателя составят:

$$\bar{q}_p = 1/\eta_k = Q_1/(N + \text{ex}Q_2); \quad (12)$$

$$\bar{q}_t = (1 - \eta_d/\eta_k)/(1 - \eta_d) = \frac{\text{ex}Q_2}{N + \text{ex}Q_2} \left/ \left(1 - \frac{N}{Q_1} \right) \right. = \eta_n \bar{q}_p; \quad (13)$$

$$\eta_n = \text{ex}Q_2/Q_2 = 1 - 2T_0/(T_b + T_0). \quad (14)$$

Для примера вычислим показатели тепловой эффективности дизельной мини-ТЭЦ по ее паспортным данным: электрическая мощность $N_{\text{э}} = 2$ МВт, тепловая мощность $Q_{\text{т}} = 2,25$ МВт, КПД по выработке электроэнергии

и теплоты $\eta_{\text{э}} = 0,40$ и $\eta_{\text{т}} = 0,45$, температура выхлопных газов $T_b = 700$ К.

1. Потребление теплоты ВП

$$Q_1 = N_{\text{э}}/\eta_{\text{э}} = Q_{\text{т}}/\eta_{\text{т}} = 2/0,4 = 5 \text{ МВт}.$$

2. Термический КПД «нижнего» цикла

$$\eta_n = 1 - 2T_0/(T_b + T_0) = 1 - 2 \cdot 300/(700 + 300) = 0,4.$$

3. Эксергия теплоты выхлопных газов двигателя

$$\text{ex}Q_2 = Q_2 \eta_n = 2,25 \cdot 0,4 = 0,9 \text{ МВт.}$$

4. Удельный расход теплоты ВП на получение работы

$$\bar{q}_p = Q_1 / (N_s + \text{ex}Q_2) = 5 / (2 + 0,9) = 1,724.$$

5. Удельный расход теплоты ВП на получение теплоты НП

$$\bar{q}_t = \bar{q}_p \eta_n = 1,724 \cdot 0,4 = 0,689.$$

6. Удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии

$$b_s = 0,123 \bar{q}_p = 0,123 \cdot 1,724 = 0,212 \text{ кг/(кВт·ч).}$$

7. Удельный расход условного топлива на выработку теплоты

$$b_t = 143 \bar{q}_t = 143 \cdot 0,689 = 98,5 \text{ кг у. т./Гкал или 24 кг у. т./ГДж.}$$

Вычисленные по «физическому» методу удельные расходы условного топлива для рассмотренной дизельной мини-ТЭЦ составляют: $b_s = 0,140 \text{ кг у. т./кВт·ч}$ и $b_t = 168 \text{ кг у. т./Гкал} = 40 \text{ кг у. т./ГДж}$. Они искажают реальные результаты преобразования энергии в комбинированных установках на -29% и $+61 \%$ соответственно, а потому не пригодны для анализа тепловой эффективности или практического применения.

ВЫВОДЫ

1. Термодинамические показатели комбинированной установки отражают физические закономерности превращения энергии топлива в теплоту и работу, а потому являются объективными критериями ее тепловой эффективности.
2. Предложенный термодинамический метод определения показателей универсален и применим к любым установкам с комбинированной выработкой.
3. Методика расчета удельных расходов топлива на ТЭЦ является, по существу, эксергетической, однако предельно проста и не требует специальных навыков для ее применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. П и р, А. Э. Эффективность выработки тепла и электроэнергии на ТЭЦ / А. Э. Пиир, В. Б. Кунтыш // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1976. – № 12. – С. 127–131.
2. П 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. 65–73.
3. П и р, А. Э. Определение показателей тепловой и экономической эффективности ТЭЦ без разделения расхода топлива и оборудования по видам продукции / А. Э. Пиир, В. Б. Кунтыш // Теплоэнергетика. – 2006. – № 5. – С. 66–70.
4. Б а й р а ш е в с к и й, Б. А. Оценка эффективности когенерационной установки с позиций адекватных показателей мини-ТЭЦ / Б. А. Байрашевский, Н. П. Борушко, М. И. Шавельзон // Энергия и менеджмент. – 2005. – № 4. – С. 14–17.
5. Г о х ш т е й н, Д. П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок / Д. П. Гохштейн. – М.: Энергия, 1964. – 368 с.
6. Г л а д у н ц о в, А. И. По поводу энергетического обеспечения действующего способа распределения топлива на ТЭЦ / А. И. Гладунцов, Ю. В. Пустовалов // Теплоэнергетика. – 1989. – № 2. – С. 52–53.
7. В у к а л о в и ч, М. П. Техническая термодинамика / М. П. Вукалович, И. И. Новиков. – М.: Машиностроение, 1972. – 670 с.

Представлена кафедрой

энергосбережения, гидравлики
и теплотехники БГТУ

Поступила 03.09.2012