

ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.165:621.438

© Сапрыкин Г.С.¹, Житаренко В.М.²

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИННЫХ ТЭЦ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Определены характеристики газотурбинных ТЭЦ с газовыми турбинами отечественных фирм при малых и средних тепловых нагрузках. Проанализировано влияние КПД ГТУ и температуры уходящих газов из котла-утилизатора на экономию тепловых ресурсов.

Ключевые слова: газовая турбина, теплофикация, удельный расход топлива, коэффициент использования тепла, экономия.

Саприкін Г.С., Житаренко В.М. Ефективність газотурбінних ТЕЦ у енергосистемах. Визначено характеристики газотурбінних ТЕЦ з газовими турбінами вітчизняних фірм при малих і середніх теплових навантаженнях. Проаналізовано вплив ККД ГТУ і температури відхідних газів з котла-утилізатора на економію теплових ресурсів.

Ключові слова: газова турбіна, теплофікація, питома витрата палива, коефіцієнт використання тепла, економія.

G.S. Saprykin, V.M. Zhitarenko. Effectiveness of gas turbine TPP in power systems. The characteristics of gas turbine TPP gas turbines with domestic firms for small and medium-sized heat loadswere determined. The influence of the gas turbine efficiency and flue gas temperature from the boiler to heat saving resources was analyzed.

Keywords: gas turbine, district heating, specific fuel consumption, the utilization rate of heat savings.

Постановка проблемы. Традиционно основной технологией для ТЭЦ Украины была паротурбинная теплофикация, дающая большую экономию топлива, является одним из основных направлений развития энергетики Украины.

Анализ последних исследований и публикаций. В последнее время интенсивно развиваются газотурбинная и парогазовая технологии. Указанные технологии могут использоваться как для модернизации существующих, так и для строительства новых ТЭЦ на основе отечественных газовых турбин НПП "Машпрект", ОАО "Турбоатом" и ОАО "Моторсич". Теплофикационные ГТУ в отличие от паротурбинных сохраняют высокие энергетические и экономические показатели и при небольших единичных мощностях 10÷25 МВт и ниже, что позволяет строить, строить высокоэкономичные ГТЭЦ [1, 2].

Цель статьи – исследование влияния различных эксплуатационных факторов на эффективности газотурбинных ТЭЦ в энергосистемах Украины.

Изложение основного материала. Тепло внешним потребителям $Q_{вн}$ на ГТЭЦ отпускается уже полностью отработавшим в газотурбинном цикле. Его величина может быть определена по тепловому балансу установки

$$Q_{КС} = N_э q_{КС} = N_э / \eta_{эм} + Q_{вн} + Q_{ух} + Q_{ов} + Q_{ос}, \quad (1)$$

где $Q_{КС}$ – тепло топлива, сжигаемого в камере сгорания;
 $N_э$ – электрическая мощность ГТУ;

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь
² ст. преп. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» г. Мариуполь, zhitarenko_v_m@pstu.edu

Q_{yx} – тепло уходящих газов из теплообменников;
 $Q_{ов}$ – тепло уносимое водой из промежуточного охладителя воздуха (при его наличии);
 $Q_{ос}$ – теплотери через ограждающие стенки агрегатов;
 $\eta_{эм}$ – электромеханический КПД ГТУ.

Обычно принимают $Q_{ос} \cong 0$, а при отсутствии промощаждения воздуха $Q_{ов} = 0$. Тогда

$$Q_{кс} = N_{э} / \eta_{эм} + Q_{вн} + Q_{yx}, \quad (2)$$

а удельный расход тепла топлива в камере сгорания ГТУ

$$q_{кс} = \frac{Q_{кс}}{N_{э}} = \frac{1}{\eta_{эм}} + \frac{Q_{вн}}{N_{э}} + \frac{Q_{yx}}{N_{э}} = \frac{1}{\eta_{эм}} + q_{вн} + q_{yx}, \quad (3)$$

где $q_{вн} = \frac{1}{\frac{N_{э}}{Q_{вн}}} = \frac{1}{w}$, $w = \frac{N_{э}}{Q_{вн}}$ – удельная выработка электроэнергии на базе теплового по-

ребления.

Удельные потери тепла с уходящими газами

$$q_{yx} = \frac{c_p G(t_{yx} - t_1)}{N_{э}} = \frac{c_p d(t_{yx} - t_1)}{3600} = \frac{c_p d(\Delta t)}{3600}, \quad (4)$$

где $d = \frac{3600G}{N_{э}}$ – удельный расход газов, кг/кВт ч;

G – массовый расход газов, кг/с;

t_{yx} , t_1 – температура уходящих газов и окружающего воздуха.

К основным показателям энергетической эффективности функционирования ТЭЦ относятся: абсолютный КПД ТЭЦ по выработке (отпуску) электроэнергии при работе по чисто силовому циклу

$$\eta = \frac{N_{э}}{Q_{кс}} = \frac{1}{q_{кс}}. \quad (5)$$

Коэффициент использования тепла топлива

$$\eta_{и.т.} = \frac{N_{э} + Q_{вн}}{Q_{кс}}; \quad (6)$$

частный КПД по производству электроэнергии

$$\eta^{\circ} = \frac{N_{э}}{Q_{кс} - Q_{вн}} = \frac{1}{q_{кс} - q_{вн}}. \quad (7)$$

Каждый из этих коэффициентов позволяет оценить энергетическую эффективность ТЭЦ с определенных позиций. Однако главным показателем топливной эффективности Г-ТЭЦ является размер реальной экономии топлива в энергосистеме (относительная экономия топлива в энергосистеме)

$$\bar{B}_{эк}^c = \frac{B_{разд} - B_{ГТЭЦ}}{B_{разд}} = 1 - \frac{B_{ГТЭЦ}}{B_{разд}}, \quad (8)$$

где $B_{разд} = B_{кэс} + B_{кот}$ – суммарный расход топлива при раздельном энергоснабжении (КЭС + котельная);

$B_{кэс}$ – расход топлива на замещаемой КЭС на выработку соответствующего количества электроэнергии;

$B_{кот}$ – расход топлива на выработку тепла $Q_{вн}$ на замещаемой котельной.

Для теплоэлектроцентрали любого типа не существует единого показателя, который бы оценивал преимущества теплофикации и давал возможность судить о степени совершенства системы агрегатов, установленных на ТЭЦ.

Коэффициент использования топлива на ТЭЦ $\eta_{и.т.}$ является балансовым показателем. Частный КПД по производству электроэнергии η° основан на физическом методе разделения расхода тепла (топлива) на ТЭЦ между производством электроэнергии и тепла.

Как и все известные методы распределения затрат тепла (топлива) в комплексных произ-

водствах физический метод мало обоснован. Однако расчеты этим методом относительно просты и наглядны [1, 2].

Удельные расходы тепла в формуле (7) равны $q_{kc} = \frac{1}{\eta}$, $q_{вн} = \frac{1}{w}$, тогда из нее получим

$$\eta^3 = \left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{w} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Удельная выработка на тепловом потреблении определяется из уравнения теплового баланса (3)

$$w = \frac{1}{q_{вн}} = \left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta_{эм}} - q_{yx} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Расход газов G при заданной мощности ГТУ определяется как

$$G = N_3 / l_2,$$

где l_2 – удельная полезная работа газового цикла.

В свою очередь удельный расход газов

$$d = \frac{G}{N_3} = f(l_2), \quad (11)$$

т. е. зависимость достаточно сложная. Поэтому в [1] на основе обработки многочисленных данных по существующим и проектируемым ГТУ разных фирм и заводов получено приближенное соотношение

$$d = k_d - 100\eta. \quad (12)$$

В нем коэффициент k_d для разных типов ГТУ меняется в узком коридоре от 45 до 49 (в среднем $k_d = 47 \dots 48$). При подстановке (12) в (4) получим

$$q_{yx} = c_p (k_d - 100\eta) \frac{\Delta t}{3600}, \quad (13)$$

а удельная выработка на тепловом потреблении определяется как

$$w = \left[\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta_{эм}} - c_p (k_d - 100\eta) \frac{\Delta t}{3600} \right]^{-1}. \quad (14)$$

Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении зависит в основном от КПД η и Δt . Показатели энергоэффективности рассмотрены на примере ГТУ трех украинских фирм: ГТГ-6, ГТЭ-45 и ГТГ-110 (соответственно мощностей 6,7, 54 и 110 МВт; КПД при работе по чисто силовому циклу – 31,5, 28 и 36%). Характеристика утилизирующих поверхностей нагрева при проектировании ГТУ выбираются по технико-экономическому обоснованию: удельный расход газов d 16,56, 18,1, 11,7 кг/кВт ч; выработка электроэнергии на тепловом потреблении 0,68; 0,51; 0,71; возможный отпуск тепла 9,8; 106 и 155 МВт, расход рабочего тепла 31, 271 и 357 кг/с, коэффициент k_d в формуле (12) 48,1; 46 и 48. Кроме того в расчетах принято: $c_p = 1,05$ кДж/кг К, $\eta_{эм} = 0,98$ и $k_d = 48$. Температура уходящих газов принималась равной 90°C ($\Delta t = 75^\circ\text{C}$), 110°C ($\Delta t = 95^\circ\text{C}$), 130°C ($\Delta t = 115^\circ\text{C}$).

Подставив (10) в (9), получим

$$\eta^3 = \left(\frac{1}{\eta_{эм}} + q_{yx} \right)^{-1}. \quad (15)$$

С учетом (13) выражение (15) принимает вид

$$\eta^3 = \left[\frac{1}{\eta_{эм}} + c_p (k_d - 100\eta) \frac{\Delta t}{3600} \right]^{-1}. \quad (16)$$

На рис. 1 представлена зависимость удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении (условно кривая изменения w для разных ГТУ проведены сплошными линиями). С увеличением КПД ГТУ η и температуры уходящих газов t_{yx} выработка на тепловом потреблении растет.

При $\eta \geq 0.35$ ω достигает значений 0,7...0,8, что заметно выше, чем в мощных паротурбинных установках. Примерно таких значений как и ω достигает и электрический КПД $\eta^э$.

Коэффициент использования тепла топлива можно представить в виде

$$\eta_{ит} = \frac{N_э + Q_{вн}}{Q_{кв}} = \frac{N_э}{Q_{кв}} + \frac{Q_{вн}}{Q_{кв}} = \eta + \frac{Q_{вн}\eta}{N_э} = \eta \left(1 + \frac{1}{w} \right). \quad (17)$$

Подставив в (17) величину w из (14) получим

$$\eta_{ит} = \eta \left[1 + \left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta_{эм}} - c_p (k_d - 100\eta) \frac{\Delta t}{3600} \right) \right]. \quad (18)$$

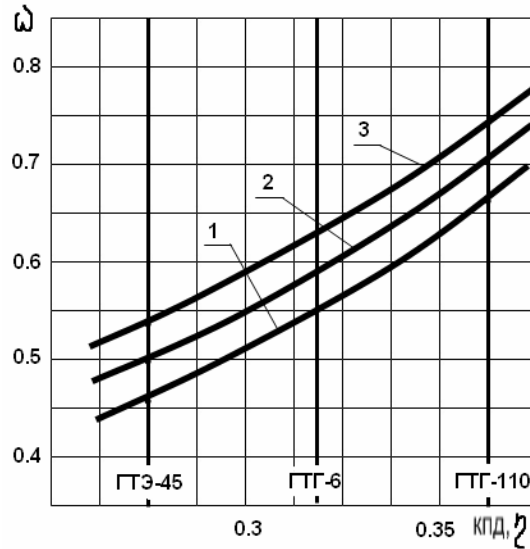


Рис. 1 – Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении: температура уходящих газов из КУ: 1 – 90°C; 2 – 110°C; 3 – 130°C

В рассматриваемом интервале температуры уходящих газов и КПД ГТУ η коэффициент использования тепла топлива $\eta_{ит}$ лежит в пределах 0,8..0,9 и остается практически постоянным при $\Delta t = \text{const}$ ($t_{yx} = \text{const}$).

Удельный расход условного топлива на производство электроэнергии на ГТЭЦ определяется по выражению

$$b^э = \frac{0,123}{\eta^э} = \frac{0,123}{\frac{1}{\eta} - \frac{1}{w}} = \frac{0,123}{\frac{1}{\eta_{эм}} + q_{yx}}, \quad \frac{\text{кг.у.т}}{\text{кВт ч}}, \quad (19)$$

если воспользоваться формулами (9) и (14).

Часовой расход топлива на производство тепловой энергии на ГТЭЦ

$$B^T = B - B^э = (b - b^э) N_э, \quad (20)$$

где $b = \frac{0,123}{\eta}$ – удельный расход топлива в силовом режиме.

Подставив в (20) значение $b^э$ по (19), получим

$$B^T = \frac{0,123 N_э}{w} = 0,123 Q_{вн}, \quad (21)$$

и удельный расход

$$b^T = \frac{0,123}{w}, \quad \frac{\text{кг.у.т}}{\text{кВт ч}}. \quad (22)$$

Величина b^T составляет экономию топлива $b_{эж}$ в теплофикационном режиме по сравнению с силовым режимом.

Удельный расход топлива на выработку тепловой энергии отпущенной внешним потребителям с учетом КПД камеры сгорания

$$b^T = \frac{B^T 10^6}{3600 \cdot Q_{\text{вн}} \eta_{\text{кэс}}} = \frac{0,123 \cdot 10^6}{3600 \eta_{\text{кэс}}} = \frac{34,1}{\eta_{\text{кэс}}}, \frac{\text{кг.у.м}}{\text{ГДж}}. \quad (23)$$

Доли топлива (β^3 и β^T) затрачиваемого на выработку электро- и тепловой энергии определяются по часовому расходу топлива на ТЭЦ $B = b N_э$ и его затратам на выработку электро-энергии $B^э = b^э N_э$,

$$\beta^э = \frac{B^э}{B} = \frac{b^э}{b} = \frac{\eta}{\eta^э}. \quad (24)$$

Подставив (9) в (24) получим

$$\beta^э = 1 - \frac{\eta}{w}; \quad \beta^T = 1 - \beta^э = \frac{\eta}{w}. \quad (25)$$

Доля топлива, затрачиваемая на выработку электроэнергии меняется с 40% (ГТЭ-45, $t_{\text{yx}}=90^\circ\text{C}$) до 54% (ГТГ-110, $t_{\text{yx}}=130^\circ\text{C}$).

Экономия топлива в энергосистеме при условии равенства выработки электроэнергии и тепла при раздельной и комбинированной выработке согласно формуле (8) составит

$$B_{\text{эк}}^c = 1 - \frac{B_{\text{Г-ТЭЦ}}}{B_{\text{кэс}} + B_{\text{кот}}}, \quad \text{или} \quad B_{\text{эк}}^c = 1 - \frac{B \cdot N_э}{b_{\text{кэс}} N_э + b_{\text{кот}} B_{\text{вн}}} = \frac{1}{1 + \frac{b_{\text{кот}}}{b_{\text{кэс}} \eta_{\text{кэс}}}}, \quad (26)$$

$$= 1 - \frac{b \cdot N_э}{b_{\text{кэс}} N_э + b_{\text{кот}} \frac{N_э}{w}} = 1 - \frac{b}{b_{\text{кэс}} + \frac{b_{\text{кот}}}{w}} = 1 - \frac{\eta}{\frac{1}{\eta_{\text{кэс}}} + \frac{1}{\eta_{\text{кот}} w}}$$

где $\eta_{\text{кэс}}$, $\eta_{\text{кот}}$ – КПД замещающей КЭС и котельной.

В дальнейших расчетах КПД котельной принят равным $\eta_{\text{кот}} = 0,85$. КПД КЭС принимался равным $\eta_{\text{кэс}} = 0,28$ (средне взвешенный за 2010 г. по энергосистеме Украины), $\eta_{\text{кэс}} = 0,36$ (средне взвешенный по блочной части энергосистемы) и $\eta_{\text{кэс}} = 0,38$ (средне взвешенный по этой части системы, но при проектных значениях удельного расхода топлива по блокам). Результаты расчетов представлены на рис. 2.

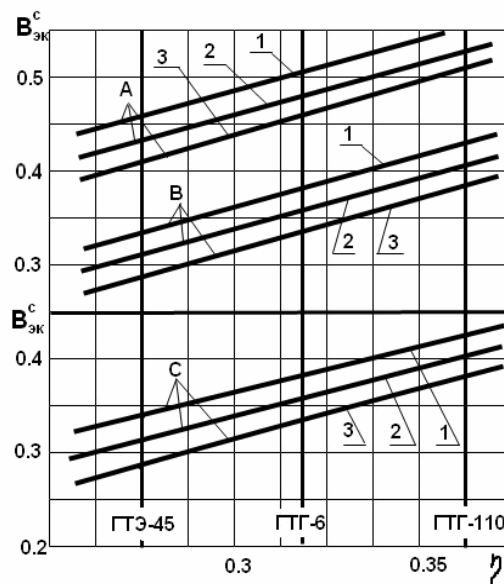


Рис. 2 – Относительная экономия топлива в энергосистеме в зависимости от КПД ГТУ: А - $\eta_{\text{кэс}} = 0,28$; В - $\eta_{\text{кэс}} = 0,36$; С - $\eta_{\text{кэс}} = 0,38$. Температура уходящих газов из КУ: 1 - 90°C ; 2 - 110°C ; 3 - 130°C

При сложившихся соотношениях экономичности ГТУ и паротурбинных установок КЭС,

удельный расход топлива по ГТУ больше, чем по установкам КЭС, $q = \frac{1}{\eta} > q_{КЭС} = \frac{1}{\eta_{КЭС}}$, что с учетом этого экономия топлива на отпуск теплоты внешним потребителям составит

$$Q_{эк} = \frac{Q_{вн}}{\eta_{кот}} - \Delta(q - q_{кэс}), \quad (27)$$

где Δ – выработка электроэнергии за рассматриваемое время.

Удельная экономия тепла на единицу отпущенного составит

$$q_{эк} = \frac{Q_{эк}}{Q_{вн}} = \frac{1}{\eta_{кот}} - \frac{\Delta}{Q_{вн}(q - q_{кэс})} = \frac{1}{\eta_{кот}} - w(q - q_{кэс}) = \frac{1}{\eta_{кот}} - w\left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta_{кэс}}\right). \quad (28)$$

Формула (28) дает возможность проанализировать влияние на величину экономии $q_{эк}$ характеристик ГТУ и удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Выводы

1. Энергетическая эффективность газотурбинных ТЭЦ определяется в основном КПД ГТУ и температурой уходящих газов из котла – утилизатора.
2. Удельный расход топлива на ГТЭЦ заметно ниже, чем на современных паротурбинных установках большой мощности практически для всей номенклатуры отечественных ГТУ.
3. Предложенная методика оценки эффективности ГТЭЦ позволит оптимальным образом подбирать утилизационное оборудование при проектировании.

Список использованных источников:

1. Чаташвили Г.П. К методике расчета показателей эффективности газотурбинных ТЭЦ / Г.П. Чаташвили // Теплоэнергетика. – 2001. – №8. – С. 32-40.
2. Сазанов П.В. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий / П.В. Сазанов, В.И. Ситас. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 356 с.

Bibliography:

1. Chatashvili G.P. By the method of calculating the performance of gas turbine TPP / G.P. Chatashvili // Thermal Power Engineering. – 2001. – № 8. – P. 32-40. (Rus.)
2. Sazanov P.V. Thermal energy systems of industrial enterprises / P.V. Sazanov, V.I. Sitas. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 356 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛПГУ»

Статья поступила 24.04.2014

УДК 621.412

© Ткаченко К.І.*

ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДВИГУНІВ СТИРЛІНГА

Запропонована математична модель вільнопоршневого двигуна Стирлінга. З використанням отриманої методики розраховані параметри роботи серійно виробляемого прототипу, що підтвердило коректність розробленої математичної моделі.

Ключові слова: двигун Стирлінга, вільнопоршневий двигун, математичне моделювання.

Ткаченко К.І. К вопросу моделирования работы двигателей Стирлинга. Предложена математическая модель свободнопоршневого двигателя Стирлинга. С использованием полученной методики рассчитаны параметры работы серийно про-

* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, kostyantyn@gmail.com