

ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОГАЗОВЫХ ТЭЦ С КОТЛАМИ-УТИЛИЗАТОРАМИ

Асп. ЛЕВШИН Н. В.

Белорусская государственная политехническая академия

Тепловые электрические станции с парогазовыми установками с котлами-утилизаторами (КУ), использующими в качестве топлива природный газ, — единственные ТЭС, которые в конденсационном цикле производят электроэнергию с КПД нетто выше 50 %. Это обстоятельство объясняет значительный интерес, проявленный к ним в РБ и за рубежом, где они получили широкое распространение.

Наибольшее применение получили ПГУ-ТЭЦ с котлами-утилизаторами. Это и объясняет их рассмотрение в данной статье. В тепловых схемах таких установок теплота внешнему потребителю отпускается как из отборов паровой турбины, так и непосредственно из котла-утилизатора.

В настоящее время для оценки энергетической эффективности теплофикационных ГТУ и ПГУ используются различные показатели. Часто с этой целью применяются КПД или соответствующие удельные расходы топлива по производству электроэнергии и теплоты. Однако в этом случае неизбежно возникает необходимость разделения топливных затрат между электрической и тепловой энергией, принцип которой однозначно не установлен (УРТ на производство теплоты может устанавливаться по его физическому эквиваленту, исходя из пропорционального разделения потерь с уходящими газами между производимыми видами энергии и др.). В итоге затрудняется сопоставление эффективности теплофикационных ГТУ и ПГУ по результатам различных исследований.

В ряде случаев для оценки эффективности теплофикационных ГТУ и ПГУ применяются коэффициент использования топлива

$$K_{\text{ит}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{от}} + Q_{\text{от}}}{V_{\text{ТЭЦ}} Q_{\text{р}}^{\text{н}}}$$

и удельная выработка электроэнергии (нетто) на тепловом потреблении

$$y_3 = \frac{\mathcal{E}_{\text{т}} - \Delta \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{т}}}{Q_{\text{от}}},$$

где $\mathcal{E}_{\text{от}}$ — отпущенная в сеть электроэнергия;

$Q_{\text{от}}$ — суммарное количество отданной в сеть теплоты;

$Q_{\text{р}}^{\text{н}}$ — теплотворная способность сожженного на ТЭЦ топлива;

$\mathcal{E}_{\text{т}}$ — электроэнергия на ТЭЦ, выработанная комбинированным путем;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{т}}$ — расход этой электроэнергии на собственные нужды ТЭЦ, связанный с комбинированной выработкой и транспортом отдаваемой в сеть теплоты.

Недостатком данных показателей является то, что их обособленное использование дает ошибочные результаты.

Так, согласно [4], в ряде случаев увеличение $K_{ит}$ ТЭЦ может быть достигнуто не улучшением, а ухудшением работы ТЭЦ, приводящим к перерасходу топлива в энергосистеме. Например, если полностью остановить турбины ТЭЦ и потребителям отдавать теплоту дросселированного острого пара из котлов, то $K_{ит}$ такой установки повысится в результате отсутствия механических потерь в турбине и генераторе, а также за счет уменьшения расхода электроэнергии на собственные нужды ТЭЦ. При этом уменьшится значение удельного расхода топлива на отпуск теплоты. Однако в результате снижения значения y_3 до нуля экономия топлива от теплофикации также уменьшится до нуля. Значение y_3 возрастает при снижении степени утилизации теплоты газов в котлах-утилизаторах, хотя тепловая экономичность установки при этом уменьшается.

Действительная величина экономии топлива от комбинированной выработки электроэнергии и теплоты на ТЭЦ может быть определена только при совместном учете значений $K_{ит}$ и y_3 с обязательным учетом показателей раздельной выработки энергии.

В настоящей статье в качестве энергетического показателя теплофикационных ПГУ с КУ использована относительная экономия топлива против раздельной схемы энергоснабжения

$$\Delta \bar{B}_{эк} = \frac{N_{пгу} b_{зам}^{КЭС} + Q_{пгу} b_{зам}^{кот} - B_{пгу}}{B_{пгу}}, \quad (1)$$

где $N_{пгу}$ — мощность ПГУ;

$Q_{пгу}$ — количество теплоты, отпущенной от ПГУ;

$B_{пгу}$ — расход топлива на ПГУ;

$b_{зам}^{КЭС}$, $b_{зам}^{кот}$ — удельные расходы топлива на замещающей КЭС и котельной.

Основные энергетические показатели ПГУ-ТЭЦ с КУ в формуле (1) можно определить, исходя из общеизвестных положений [1–3] и используя схему тепловых потоков такой ТЭЦ (рис. 1).

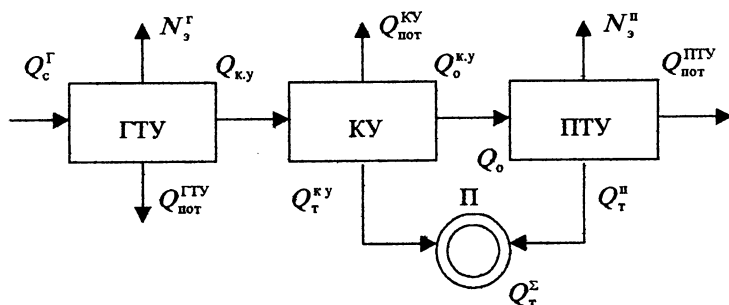


Рис. 1. ГТУ — газотурбинная установка; КУ — котел-утилизатор; ПТУ — паротурбинная установка; П — потребитель; $N_3^Г$, $N_3^П$ — мощность ГТУ и ПТУ соответственно; $Q_т^П$ — количество теплоты, отпущенной от паротурбинной установки; $Q_т^КУ$ — то же, от котла-утилизатора; $Q_c^Г$ — теплота подведенного к камере сгорания ГТУ топлива; $Q_{отт}^{ГТУ}$, $Q_{отт}^{КУ}$, $Q_{отт}^{ПТУ}$ — потери теплоты в соответствующих элементах установки

Путем несложных преобразований (1) можно переписать в виде:

$$\Delta \bar{B}_{\text{эк}} = \left(\frac{1 + A_{\text{ПГУ}}}{A_{\text{ПГУ}}} b_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} + \frac{Q_{\text{ПГУ}}}{N_{\text{ПГУ}}} b_{\text{зам}}^{\text{кот}} \right) \eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}} Q_{\text{р}}^{\text{н}} - 1. \quad (2)$$

Здесь $A_{\text{ПГУ}} = \frac{N_{\text{э}}^{\text{г}}}{N_{\text{э}}^{\text{п}}}$ – энергетический коэффициент сложного цикла

ПГУ;

$$B_{\text{ПГУ}} = \frac{N_{\text{э}}^{\text{г}}}{\eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}} Q_{\text{р}}^{\text{н}}} - \text{расход топлива на ПГУ};$$

$Q_{\text{р}}^{\text{н}}$ – теплота сгорания топлива;

$\eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}}$ – электрический КПД ГТУ.

Количество теплоты, отпущенной внешнему потребителю:

$$Q_{\text{ПГУ}} = Q_{\text{т}}^{\Sigma} = Q_{\text{т}}^{\text{КУ}} + Q_{\text{т}}^{\text{п}} = \beta_{\text{т}}^{\text{п}} Q_{\text{о}} + \frac{\beta_{\text{т}}^{\text{КУ}}}{\eta_{\text{т}}^{\text{тп}}} Q_{\text{о}} = \left(\beta_{\text{т}}^{\text{п}} + \frac{\beta_{\text{т}}^{\text{КУ}}}{\eta_{\text{т}}^{\text{тп}}} \right) Q_{\text{о}}, \quad (3)$$

где $\beta_{\text{т}}^{\text{п}} = \frac{Q_{\text{т}}^{\text{п}}}{Q_{\text{о}}}$ – доля теплоты теплофикационной ПТУ, затраченной на внешнее потребление;

$\beta_{\text{т}}^{\text{КУ}} = \frac{Q_{\text{т}}^{\text{КУ}}}{Q_{\text{о}}^{\text{КУ}}}$ – доля теплоты, отпущенная от котла-утилизатора внеш-

нему потребителю.

Расход теплоты на паровую турбину составит

$$Q_{\text{о}} = \frac{1}{1 - \beta_{\text{т}}^{\text{п}}} \cdot \frac{N_{\text{э}}^{\text{п}}}{\eta_{\text{э}}^{\text{ПТУ}}}, \quad (4)$$

где $N_{\text{э}}^{\text{п}}$ – мощность паровой части;

$\eta_{\text{э}}^{\text{ПТУ}}$ – КПД ПТУ по производству электроэнергии;

$\eta_{\text{т}}^{\text{тп}}$ – КПД транспорта теплоты, примерно равный 0,985.

Отсюда после подстановки (4) в (3) и (3) в (2) имеем:

$$\Delta \bar{B}_{\text{эк}} = \left(\frac{1 + A_{\text{ПГУ}}}{A_{\text{ПГУ}}} b_{\text{КЭС}}^* + \frac{(\beta_{\text{т}}^{\text{п}} + \beta_{\text{т}}^{\text{КУ}} / \eta_{\text{т}}^{\text{тп}}) b_{\text{кот}}^*}{(1 - \beta_{\text{т}}^{\text{п}}) A_{\text{ПГУ}} \eta_{\text{э}}^{\text{ПТУ}}} \right) \eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}} - 1,$$

где

$$b_{\text{КЭС}}^* = b_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} Q_{\text{р}}^{\text{н}};$$

$$b_{\text{кот}}^* = b_{\text{зам}}^{\text{кот}} Q_{\text{р}}^{\text{н}}.$$

Аналогично данную зависимость можно получить с использованием удельной выработки электроэнергии на единицу теплоты, полезно использованной в КУ [5]. Учитывая, что

$$\frac{1 + A_{\text{ПГУ}}}{A_{\text{ПГУ}}} = \frac{N_{\text{ПГУ}}}{N_3^r},$$

имеем

$$\frac{N_{\text{ПГУ}}}{N_3^r} = \frac{\bar{\Theta}_{\text{ПГУ}}}{\bar{\Theta}_r},$$

где $\bar{\Theta}_{\text{ПГУ}}$ – удельная выработка электроэнергии ПГУ на единицу теплоты, полезно использованной в парогенераторной установке при работе ПТУ в смешанном теплофикационно-конденсационном режиме;

$$\bar{\Theta}_{\text{ПГУ}} = \bar{\Theta}_r + \bar{\Theta}_k(1 - \alpha) + \frac{\bar{\Theta}_r \alpha}{(1 + \bar{\Theta}_r / \eta_{\text{ЭМ}}^{\text{п}})},$$

где $\bar{\Theta}_r = \frac{(T_3 - T_4)\eta_{\text{ЭМ}}^r - (T_2 - T_1) / \eta_{\text{ЭМ}}^k}{T_4 - T_5}$ – удельная выработка электроэнергии ГТУ на единицу теплоты, полезно использованной в КУ;

$\bar{\Theta}_r = \frac{(1 - T_r / T_0)\eta_{\text{oi}}^{\text{п}}\eta_{\text{ЭМ}}^{\text{п}}}{T_r / T_0 + (1 - T_r / T_0)(1 - \eta_{\text{oi}}^{\text{п}})}$ – удельная выработка электроэнергии ПТУ на единицу теплоты, отведенной в систему теплоснабжения;

T_r – средняя температура отвода теплоты из цикла ПТУ в систему теплоснабжения;

T_0 – средняя температура подвода теплоты в паротурбинный цикл.

Удельную выработку электроэнергии ПТУ можно определить и из соотношения мощностей газовой и паровой частей

$$\bar{\Theta}_r = \frac{\bar{\Theta}_r}{A_{\text{ПГУ}} - \bar{\Theta}_r / \eta_{\text{ЭМ}}^{\text{п}}}.$$

Удельная выработка электроэнергии ПТУ на единицу теплоты, полезно использованной в КУ при работе паровой турбины ПГУ в чисто конденсационном режиме:

$$\bar{\Theta}_k = \eta_t \eta_{\text{oi}} \eta_{\text{пи}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{Г}}.$$

Здесь η_t – термический КПД конденсационного цикла ПТУ, определяемый из выражения

$$\eta_t = 1 - \frac{T_k}{T_0},$$

где T_k – температура насыщения пара, отводимого в конденсатор;

$\eta_{\text{oi}}, \eta_{\text{м}}, \eta_{\text{Г}}$ – КПД относительный внутренний, механический и генератора ПТУ.

Коэффициент полезного использования отработавшей теплоты, отведенной от ГТУ к парогенераторной установке:

$$\eta_{\text{пи}} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_1},$$

где T_5 — температура уходящих газов после котла-утилизатора.

При работе паровой турбины ПГУ с КУ в смешанном режиме, т. е. в конденсационном режиме с одновременным отводом теплоты из отборов паровой турбины в систему теплоснабжения, должна быть задана доля тепловой нагрузки α или тепловая нагрузка парогенераторной установки $\alpha Q_4 \eta_{\text{пи}}$, используемая для теплофикационной выработки в паровой турбине, или же должна быть задана нагрузка Q_T отбора паровой турбины, отдаваемая в систему теплоснабжения. В последнем случае на основе уравнения

$$\frac{Q_4}{Q_T} = \frac{1}{\eta_{\text{пи}}} \left[1 + \frac{\bar{\Theta}_T}{\eta_{\text{эм}}^{\text{п}}} \right]$$

по известному значению Q_T и $\bar{\Theta}_T$ определяется тепловая нагрузка, используемая для теплофикационной выработки в паровой турбине:

$$\alpha Q_4 \eta_{\text{пи}} = Q_T (1 + \bar{\Theta}_T / \eta_{\text{эм}}^{\text{п}}).$$

Таким образом имеем

$$\frac{1 + A_{\text{ПГУ}}}{A_{\text{ПГУ}}} = 1 + \frac{\bar{\Theta}_K (1 - \alpha)}{\bar{\Theta}_T} + \frac{\alpha}{A_{\text{ПГУ}}}.$$

После подстановки в основную зависимость получаем

$$\Delta \bar{B}_{\text{ЭК}} = (b_{\text{КЭС}}^* (1 + \frac{\bar{\Theta}_K (1 - \alpha)}{\bar{\Theta}_T} + \frac{\alpha}{A_{\text{ПГУ}}}) + \frac{(\beta_T^{\text{п}} + \beta_T^{\text{КУ}} / \eta_{\text{ТР}}^{\text{п}}) b_{\text{кот}}^*}{(1 - \beta_T^{\text{п}}) A_{\text{ПГУ}} \eta_{\text{э}}^{\text{ПГУ}}}) \eta_{\text{э}}^{\text{ПГУ}} - 1.$$

ВЫВОДЫ

1. Показатель $\Delta \bar{B}_{\text{ЭК}}$ однозначно характеризует системную эффективность ПГУ, так как он непосредственно определяет достигаемую при этом экономию топлива в энергосистеме.

2. Разработана методика определения $\Delta \bar{B}_{\text{ЭК}}$ для парогазовой ТЭЦ с КУ, позволяющая выполнять подробный анализ факторов, влияющих на экономичность установки.

3. Использование удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении для сравнительного анализа ПГУ и ПСУ ТЭЦ требует специального исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции. — М: Энергоатомиздат, 1987.
2. Горбачинский С. И., Цанев С. В., Клевцов А. В. К методике расчета энергетических показателей ПГУ с утилизационными паровыми котлами // Электрические станции. — 1994. — № 6. — С. 49—52.
3. Горюнов И. Т., Цанев С. В., Буров В. Д., Дорощев С. Н. К вопросу определения энергетических показателей ГТУ-ТЭЦ // Электрические станции. — 1995. — № 4.
4. Андрющенко А. И. О некоторых ошибках в методике определения экономичности газотурбинной надстройки ТЭЦ // Энергетика и электрификация. — 1996. — № 3.
5. Соколов Е. Я., Мартынов В. А. Энергетические характеристики парогазовых теплофикационных установок // Теплоэнергетика. — 1996. — № 4.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 11.11.1999