

УДК 621.577

## СИСТЕМНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Маринович А.Н., магистрант

Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

Энергетическая эффективность применения пароконденсационных теплонасосных установок (ТНУ) в качестве источников теплоснабжения (теплохладоснабжения) доказана давно. Однако практическое использование в государствах СНГ ТНУ получили только в последние годы в дефицитных по топливу регионах и на объектах, где применению тепловых насосов оказывается государственная поддержка. Утилизация сбросной низкопотенциальной теплоты определяет энергетические, экономические и экологические преимущества ТНУ, однако потребление электроэнергии компрессором ТНУ существенно эти преимущества ограничивает вследствие двойной трансформации энергии (преобразование теплоты в электроэнергию на тепловых электростанциях и обратное её преобразование в теплоту в тепловом насосе).

Проведенный в [1] системный анализ энергетической эффективности ТНУ показывает, что целесообразность применения этих установок зависит от состояния и технического уровня развития энергетики страны, в которой они применяются.

Представим энергетический баланс ТНУ в виде

$$Q_{\text{отп}}^{\text{ТНУ}} = Q_{\text{иск}}^{\text{ТНУ}} + N_{\text{э}}^{\text{ТНУ}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{отп}}^{\text{ТНУ}}$ ,  $Q_{\text{иск}}^{\text{ТНУ}}$  – отпущенная потребителю теплота и исходная низкопотенциальная утилизируемая теплота;

$N_{\text{э}}^{\text{ТНУ}}$  – мощность, потребляемая ТНУ, включая мощность компрессора ТНУ, и затраты электроэнергии на собственные нужды ТНУ.

При этом коэффициент преобразования энергии в ТНУ

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{ТНУ}}}{N_{\text{э}}^{\text{ТНУ}}} = \frac{Q_{\text{иск}}^{\text{ТНУ}} + N_{\text{э}}^{\text{ТНУ}}}{N_{\text{э}}^{\text{ТНУ}}} \quad (2)$$

зависит от уровня температур низкопотенциальной и отпускаемой теплоты, а также технологической схемы установки.

Для достоверности технико-экономических расчетов, коэффициент системной эффективности теплогенерирующих установок должен учитывать полный расход первичных энергоресурсов, в том числе расход теплоты топлива на замыкающей КЭС энергосистемы.

При оценке системной эффективности ТНУ возможны разные подходы к учёту утилизируемой низкопотенциальной теплоты: вплоть до полного ее исключения. Однако поток этой теплоты нужно собрать, очистить и доставить к ТНУ, что требует определённых затрат, а низкопотенциальные тепловые отходы промышленности можно полезно использовать. С учетом сказанного, на используемую в ТНУ низкопотенциальную теплоту может устанавливаться цена. В [1] предлагается ее учитывать коэффициентом  $\xi_{\text{иск}}$ , тогда формула для расчёта коэффициента системной эффективности ТНУ с учётом (1)–(2) принимает вид:

$$K_{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{ТНУ}}}{Q_{\text{иск}}^{\text{ТНУ}} \xi_{\text{иск}} + Q_{\text{топл}}^{\text{КЭС}}} = \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{ТНУ}}}{N_{\text{э}}^{\text{ТНУ}} (1 - \varepsilon) \xi_{\text{иск}} + N_{\text{э}}^{\text{ТНУ}} (1 + \alpha_{\text{сн}}^{\text{ТНУ}}) (1 + \alpha_{\text{лэп}}) / \eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}} = \frac{1}{(1 - \varepsilon) \xi_{\text{иск}} + (1 + \alpha_{\text{сн}}^{\text{ТНУ}}) (1 + \alpha_{\text{лэп}}) / \eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}} \quad (3)$$

Коэффициент системной эффективности альтернативной котельной определим как:

$$K_{\text{кот}} = \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{кот}}}{Q_{\text{топл}}^{\text{кот}} + Q_{\text{топл}}^{\text{КЭС}}} = \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{кот}}}{\frac{Q_{\text{отп}}^{\text{кот}}}{\eta_{\text{кот}}} + Q_{\text{отп}}^{\text{кот}} \alpha_{\text{сн}}^{\text{кот}} (1 + \alpha_{\text{лэп}}) / \eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}} = \frac{1}{1/\eta_{\text{кот}} + \alpha_{\text{сн}}^{\text{кот}} (1 + \alpha_{\text{лэп}}) / \eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}} \quad (4)$$

В формулах (3) – (4):

$\alpha_{\text{лэп}}$  – доля потерь электроэнергии в электросетях;

$\alpha_{\text{сн}}^{\text{ТНУ}}$  – доля расхода электроэнергии на собственные нужды ТНУ;

$\eta_{\text{кот}}, \alpha_{\text{сн}}^{\text{кот}}$  – КПД котлов альтернативной котельной и доля расхода электроэнергии на собственные нужды котельной;

$\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}$  – КПД замыкающей КЭС энергосистемы.

В проведенных расчетах значения коэффициента преобразования энергии в ТНУ и экономического коэффициента низкопотенциальной сбросной теплоты принимались в диапазоне  $\varepsilon = 2,5-5$ ;  $\xi_{\text{иск}} = 0-0,3$ . Результаты расчетов показывают, что значение  $K_{\text{ТНУ}}$  зависит от варьируемых показателей: снижаясь при понижении  $\varepsilon$  и росте  $\xi_{\text{иск}}$  [1]; существенным является также влияние  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}$ .

Для ТНУ с наиболее характерными значениями  $\varepsilon = 3,0-4,0$  в зависимости от  $\xi_{\text{иск}}$  величина  $K_{\text{ТНУ}}$  превышает  $K_{\text{кот}}$ :

- в 1,15–1,5 раза при  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} = 0,4$ ;
- в 1,4–1,9 раза при  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} = 0,5$ ;
- в 1,5–2,0 раза при  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} = 0,55$ .

В [1] отмечается, что в середине прошлого столетия при КПД КЭС на начальные параметры пара 90 ата и 500 °С порядка  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} \approx 25\%$   $K_{\text{ТНУ}}$  во всём указанном диапазоне изменения  $\varepsilon$  даже при  $\xi_{\text{иск}} = 0$  оказывался ниже  $K_{\text{кот}}$  в 1,05–1,4 раза. Значит, в тот период ТНУ не имели системного энергетического преимущества перед котельными, что отражалось на формировании негативного отношения к ТНУ у части специалистов-энергетиков.

Рассмотрим, как меняется значение коэффициента системной эффективности ТЭЦ при переходе от паротурбинных к парогазовым технологиям, как на самих ТЭЦ, так и на замыкающих КЭС энергосистемы.

Коэффициент системной эффективности ТЭЦ можно представить в виде

$$K_{\text{ТЭЦ}} = \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{ТЭЦ}}}{Q_{\text{топл}}^{\text{ТЭЦ}} - Q_{\text{топл}}^{\text{э}}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{топл}}^{\text{ТЭЦ}}, Q_{\text{топл}}^{\text{э}}$  – полный расход теплоты топлива на ТЭЦ и часть этого расхода теплоты, относимая на выработку электроэнергии.

Если отнести весь эффект от теплофикации на отпуск теплоты  $Q_{\text{отп}}^{\text{ТЭЦ}}$ , то есть принять расход теплоты топлива, относимый на производство электроэнергии теплофикационной паротурбинной установкой (ПТУ-ТЭЦ), равным расходу топлива на производство такого же количества электроэнергии на замыкающей КЭС с КПД  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}$ , то

$$\begin{aligned}
 K_{\text{ГТУ-ТЭЦ}} &= \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{ТЭЦ}}}{\left( N_{\text{тф}}/\eta_{\text{тф}}^{\text{ТЭЦ}} + N_{\text{к}}/\eta_{\text{к}}^{\text{ТЭЦ}} + Q_{\text{отп}}^{\text{ТЭЦ}}/\eta_{\text{Q}}^{\text{ТЭЦ}} \right) - (N_{\text{тф}} + N_{\text{к}})/\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}} = \\
 &= \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{ТЭЦ}}}{\left( W_{\text{тф}}/\eta_{\text{тф}}^{\text{ТЭЦ}} + \bar{N}_{\text{к}}/\eta_{\text{к}}^{\text{ТЭЦ}} + 1/\eta_{\text{Q}}^{\text{ТЭЦ}} \right) - (W_{\text{тф}} + \bar{N}_{\text{к}})/\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}} = \\
 &= \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{ТЭЦ}}}{W_{\text{тф}}(1/\eta_{\text{тф}}^{\text{ТЭЦ}} - 1/\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}) + \bar{N}_{\text{к}}(1/\eta_{\text{к}}^{\text{ТЭЦ}} - 1/\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}) + 1/\eta_{\text{Q}}^{\text{ТЭЦ}}}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

где  $\eta_{\text{тф}}^{\text{ТЭЦ}}, \eta_{\text{к}}^{\text{ТЭЦ}}$  – КПД производства электроэнергии в теплофикационном и конденсационном циклах на ТЭЦ;

$\eta_{\text{Q}}^{\text{ТЭЦ}}$  – КПД производства теплоты на ТЭЦ;

$N_{\text{тф}}, N_{\text{к}}$  – теплофикационная и конденсационная мощности турбоустановки (при этом полная мощность турбоустановки на клеммах генератора  $N_{\Sigma} = N_{\text{тф}} + N_{\text{к}}$ );

$W_{\text{тф}}$  – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении;

$\bar{N}_{\text{к}}$  – удельная конденсационная мощность турбоустановки, приходящаяся на единицу отпускаемой от ТЭЦ теплоты.

Расчеты показывают, что на режиме теплового графика коэффициент системной эффективности паротурбинных ТЭЦ превышает значение коэффициента системной эффективности котельных в 2–3 раза при паротурбинной замыкающей КЭС с  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} = 0,4$  и в 1,35–1,55 раза при парогазовой замыкающей КЭС с  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} = 0,55$ . Большие значения  $K_{\text{ГТУ-ТЭЦ}}$  соответствуют более высоким значениям начальных параметров пара и, соответственно, удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении  $W_{\text{тф}} = 0,55$ .

Аналогично коэффициент системной эффективности газотурбинной ТЭЦ (когенерационной ГТУ) можно представить в виде

$$K_{\text{ГТУ-ТЭЦ}} = \frac{Q_{\text{отп}}^{\text{ГТУ-ТЭЦ}}}{N_{\Sigma}^{\text{ГТУ}}/\eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}} - N_{\Sigma}^{\text{ГТУ}}/\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}}. \quad (7)$$

Можно показать, что отпуск теплоты  $Q_{\text{отп}}^{\text{ГТУ-ТЭЦ}}$  от ГТУ мощностью  $N_{\Sigma}^{\text{ГТУ}}$  определяется ее КПД  $\eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}}$  и КПД котла-утилизатора  $\eta^{\text{КУ}}$

$$Q_{\text{отп}}^{\text{ГТУ-ТЭЦ}} = N_{\Sigma}^{\text{ГТУ}}/\eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}} (1 - \eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}}/\eta_{\text{зам}}^{\text{ГТУ}})\eta^{\text{КУ}}, \quad (8)$$

тогда

$$K_{\text{ГТУ-ТЭЦ}} = \frac{(1 - \eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}}/\eta_{\text{зам}}^{\text{ГТУ}})\eta^{\text{КУ}}/\eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}}}{1/\eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}} - 1/\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}}}. \quad (9)$$

При  $\eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}} = 0,33-0,35$  и  $\eta^{\text{КУ}} = 0,75-0,85$  в случае паротурбинной замыкающей КЭС с  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} = 0,4$  системная эффективность ГТУ-ТЭЦ выше котельных в 3–5 раз; в случае парогазовой замыкающей КЭС с  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} = 0,55$  системная эффективность ГТУ-ТЭЦ снижается и превышает системную эффективность котельных только в 1,4–1,7 раз.

В случае парогазовой замыкающей КЭС (ПГУ-КЭС) с  $\eta_{\text{зам}}^{\text{КЭС}} = 0,55$  системная эффективность парогазовых ТЭЦ (ПГУ-ТЭЦ) выше котельных:

- в 1,5–2 раза для ПГУ-ТЭЦ на базе ГТУ с  $\eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}} = 0,34$  и двухконтурным котлом-утилизатором (аналог ПГУ-230 Минской ТЭЦ-3);

- примерно в 4 раза для перспективных ПГУ-ТЭЦ с трехконтурными котлами-утилизаторами на базе наиболее экономичных ГТУ с  $\eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}} = 0,38$ .

Как видно из проведенного анализа, при низкой эффективности производства электроэнергии на КЭС, парокомпрессионные ТНУ не имеют энергетического преимущества перед обычными котельными ни в части эффективности использования топлива, ни в части сокращения выхода сбросного низкопотенциальной теплоты в окружающую среду. С ростом эффективности тепловых электростанций, в том числе за счет применения на них парогазовых технологий, энергетическая эффективность ТНУ существенно повышается, и эти установки должны закономерно находить все более широкое практическое применение.

#### **Литература**

1. Трутаев, В.И. Системный анализ эффективности теплонасосных установок // Энергия и менеджмент, 2011. – № 4. – С. 2–9.