

УДК 621.577+621.186.8

Клименко В.Н.

*Институт технической теплофизики НАН Украины*КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ  
КОНДЕНСАЦИОННЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Розглянуті можливості створення комбінованих енергетичних схем на основі конденсаційних паротурбінних установок з використанням теплових насосів з метою утилізації скиданої низькопотенційної теплоти парових турбін. Показано, що використання утилізованої теплоти для підігріву конденсату, що подається в котел, немає сенсу в зв'язку з низькою ефективністю цього заходу та зменшенням виробництва товарної електроенергії комбінованою установкою. Визначені межі ефективної роботи комбінованої установки з використанням утилізованої теплоти в тепломережах.

Сравнительно невысокий КПД (не более 40...45%) паро- и газотурбинных установок, работающих по простейшему циклу Ренкина и Брайтона, обусловлен большими объемами теплоты, сбрасываемой установками в окружающую среду с уходящими продуктами сгорания топлива, в системах охлаждения и в конденсаторах. Поэтому одним из эффективных путей совершенствования теплоэнергетических установок является усложнение их рабочих процессов с целью полезного использования сбрасываемой теплоты. Так, применение теплофикационных отборов и противодавленческих паровых турбин позволило увеличить коэффициент полезного использования топлива ( $K_{ит}$ ) в ПТУ до 80...85 %, применение парогазовых установок – повысить КПД генерирования электроэнергии до 60 %, применение когенерационных установок – повысить  $K_{ит}$  до 90...92 %. Следующим шагом на этом пути может явиться создание комбинированных энергетических установок, в которых базовая паротурбинная, газотурбинная или когенерационная установка надстраивается парокompрессионным тепловым насосом, ис-

Рассмотрены возможности создания комбинированных энергетических схем на базе конденсационных паротурбинных установок и тепловых насосов, утилизирующих низкопотенциальную сбросную теплоту паровых турбин. Показано, что использование утилизированной теплоты для подогрева питательной воды лишено практического смысла из-за низкой эффективности такого мероприятия и снижения полезной электрической мощности установки. Определены пределы эффективной работы комбинированной установки с использованием утилизированной теплоты в теплофикационных сетях.

Work is dedicated to the consideration of possibilities of energy schemes designation based on combined application of condensing steam turbine installations and heat pumps utilizing low-grade waste heat from steam turbine operation. It is demonstrated that usage of waste heat for feed water heating is unreasonable due to low efficiency of such measure and reduction of total useful power capacity of combined installation. The technical limits of efficient work of combined waste heat utilization installation in district heating systems are defined.

пользующим в качестве низшего источника низкопотенциальную сбросную теплоту котла, турбинного или поршневого двигателя, а для привода компрессора – механическую или электрическую энергию, производимую базовой установкой. В комбинированных схемах тепловой насос выполняет роль своеобразного утилизатора теплоты, одновременно повышающего ее потенциал от температуры низкопотенциального источника  $T_{и}$  до уровня генерирования  $T_{к}$  за счет использованной механической или электрической энергии. Для тепловых насосов связь между генерируемой теплотой  $N_T$  и электрической мощностью ТН –  $N_{ТН}$  принято выражать соотношением:

$$N_T = \varphi N_{ТН}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – тепловой коэффициент, полностью определяемый располагаемой температурой источника  $T_{и}$  и требуемым потенциалом генерируемой теплоты  $T_{к}$  [1].

Величина, обратная тепловому коэффициенту  $1/\varphi$ , характеризует долю затраченной в ТН электрической энергии в произведенной

тепловым насосом: чем выше  $\phi$ , тем эта доля меньше, т.е. эффективность ТН, как генератора теплоты, с увеличением  $\phi$  – увеличивается. Однако, качество генерируемой теплоты, т.е. повышение  $T_K$  относительно  $T_H$ , – снижается [1].

В настоящей статье рассматриваются энергетические характеристики комбинированных установок на базе конденсационных ПТУ, в которых генерируемая ТН теплота используется либо для повышения эффективности генерирования электроэнергии самой ПТУ, либо для теплоснабжения внешних потребителей. Схема потоков энергии в обоих вариантах использования тепловых насосов в комбинированных паротурбинных установках показана на рис. 1.

Идея повышения экономичности паротурбинной установки при помощи теплового насоса, использующего сбросную теплоту турбины для подогрева питательной воды, представляется на первый взгляд очевидной, т.к. согласно равенству (1) в ТН затрачивается

электрической энергии в  $\phi$  раз меньше, чем генерируется тепловой. Такая идея была рассмотрена в работе [2], в результате чего был сделан вывод о возможности существенного повышения термического КПД цикла Ренкина за счет использования ТН для подогрева питательной воды. К сожалению, этот вывод ошибочен, поэтому еще раз рассмотрим комбинированную схему ПТУ+ТН в постановке [2]. Термический КПД рассматриваемого комбинированного парового цикла определяется соотношением:

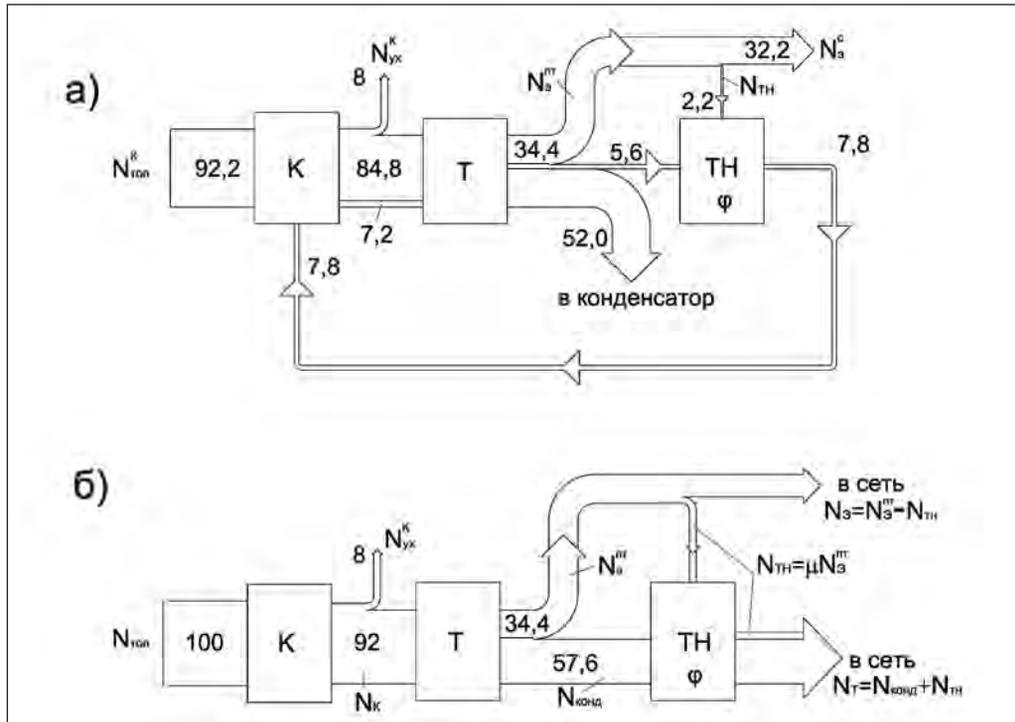
$$\eta_t^k = \frac{(q_1 - q_2) - \frac{q^{TH}}{\phi}}{q_1 - q^{TH}}, \quad (2)$$

где  $q_1$  – теплота, подведенная к рабочему телу в паровом котле,

$q_2$  – теплота цикла, отведенная в конденсаторе,

$q^{TH}$  – теплота, переданная ТН питательной воде.

Поскольку выражение  $q^{TH}/\phi$  эквивалентно электрической мощности привода ТН, то выражение (2) представляет собой отношение



**Рис. 1. Схема потоков энергии (%) в комбинированной установке на базе ПТУ с внутренним (а) и внешним (б) использованием теплоты, генерируемой ТН:  $t_H = 34,6$  °С,  $H = 296$  ккал/кг,  $\eta_K = 0,92$ ,  $\eta_e = 0,344$ ,  $t_{нс} = 100$  °С,  $\phi = 3,54$ .**

полезной мощности комбинированной установки к затратам энергии топлива на генерирование рабочего тела ПТУ.

В комбинированной установке как количество теплоты, переданной ТН питательной воде, так и тепловой коэффициент  $\varphi$ , определяющий затраты энергии в ТН на перекачку этой теплоты, определяются температурами источника теплоты (охлаждающей воды конденсатора) и питательной воды на выходе из ТН (на входе в котел), т.е. температурами испарителя и конденсатора теплового насоса  $T_{\text{и}}$  и  $T_{\text{к}}$ .

Поэтому тепловой коэффициент  $\varphi$  и величину подогрева питательной воды ПТУ за счет теплоты, генерируемой ТН, нельзя рассматривать в качестве независимых переменных, как это сделано в [2]. С увеличением теплоты, отбираемой в конденсаторе ПТУ и, как следствие, с увеличением температуры питательной воды, поступающей в котел, тепловой коэффициент применяемого ТН должен снижаться, т.е. его  $N_{\text{ТН}}$  – увеличиваться. Поэтому реальная зависимость  $\eta_i = f(t_{\text{пв}})$  носит экстремальный характер (см. рис. 2). Для рассматриваемых условий [2] работы ПТУ (температура насыщения 276 °С при давлении пара за парогенератором 6,1 МПа, температура в конденсаторе 34,6 °С, срабатываемый в турбине теплоперепад  $H = 296$  ккал/кг) термический КПД цикла Ренкина составляет 0,374. При повышении температуры питательной воды при помощи теплового насоса термический КПД парового цикла вначале несколько увеличивается, а затем монотонно снижается. Значение теплового коэффициента  $\varphi$ , при котором термический КПД комбинированного цикла становится равным КПД цикла Ренкина, можно определить из преобразованного равенства (2):

$$\eta_i^k = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}} - N_{\text{ТН}}}{N_{\text{к}} - N_{\text{т}}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}} - \mu N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}}}{N_{\text{к}} - \mu N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}} \varphi} = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}} (1 - \mu)}{N_{\text{к}} (1 - \mu \varphi \frac{N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}}}{N_{\text{к}}})} = \eta_i \frac{1 - \mu}{(1 - \mu \varphi \eta_i)}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}}$  – мощность паровой турбины, работающей по циклу Ренкина;

$N_{\text{ТН}}$  – электрическая мощность привода ТН, которую можно представить, как часть  $N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}}$  ( $N_{\text{ТН}} = \mu N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}}$ );

$N_{\text{к}}$  – тепловая мощность, подведенная к рабочему телу в котле (мощность котла);

$N_{\text{т}}$  – теплота, переданная питательной воде тепловым насосом;

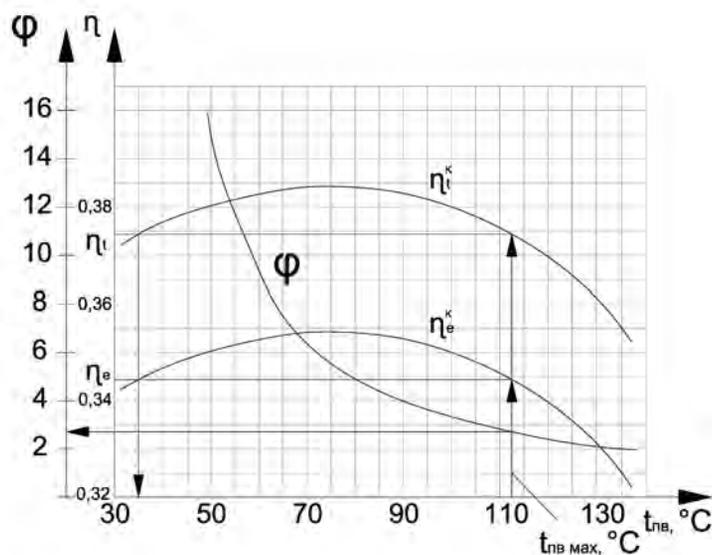
$\eta_i$  – термический КПД базовой ПТУ.

Из равенства (3) следует, что  $\eta_i^k = \eta_i$  при  $\mu = 0$ , т.е. при  $N_{\text{ТН}} = 0$ , а также при  $\varphi = 1/\eta_i$ , чему соответствуют в данном случае  $t_{\text{пв}} = 34,6$  °С, а также  $t_{\text{пв max}} = 112$  °С. При  $t_{\text{пв}} > 112$  °С  $\eta_i^k < \eta_i$ , при  $t_{\text{кond}} < t_{\text{пв}} < 112$  °С  $\eta_i^k > \eta_i$ , хотя превышение  $\eta_i^k$  над  $\eta_i$  весьма незначительное (менее 1 %).

Небольшое повышение эффективности комбинированной установки при малых подогревах питательной воды объясняется высокой энергетической эффективностью теплового насоса при генерировании теплоты низкого качества (при низкой  $T_{\text{к}}$ , т.е. высоком  $\varphi$ ). При повышении подогрева питательной воды (снижении  $\varphi$ ) эффективность ТН снижается, т.е. затраты электрической энергии парового цикла на привод ТН повышаются и при определенной  $t_{\text{пв max}}$  начинают превышать эффект экономии от повышения температуры питательной воды, что приводит к снижению КПД парового цикла. Следует отметить, что значение  $t_{\text{пв max}}$  одинаково как для термического, так и для эффективного КПД комбинированного цикла (рис. 2), т.к. соотношение между  $\eta_e^k$  и  $\eta_e$  такое же, как и между  $\eta_i^k$  и  $\eta_i$ , поскольку  $\eta_i = \eta_e/\eta_{\text{к}}$ ,  $\eta_i^k = \eta_e^k/\eta_{\text{к}}$ , а  $\eta_{\text{к}}$  для базовой ПТУ и комбинированной установки – одинаковы ( $\eta_{\text{к}}$  – КПД котла).

В любом случае увеличение подогрева питательной воды при помощи ТН приводит к снижению полезной электрической мощности установки, что ставит под сомнение целесообразность ее практической реализации.

Несколько другой результат может быть получен, если применить тепловой насос для генерирования теплоты в тепловую сеть с использованием сбросной теплоты и электроэнергии паротурбинной установки. В этом слу-



**Рис. 2.** Зависимость термического и эффективного КПД комбинированной установки, а также теплового коэффициента ТН от температуры питательной воды:  $t_{пв} = 34,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $H = 296 \text{ ккал/кг}$ ,  $\eta_i = 0,374$ ,  $\eta_e = 0,344$ ,  $\eta_k = 0,92$ .

чае вырабатываемая комбинированной установкой тепловая энергия рассматривается как полезный продукт и поэтому  $K_{ИТ}$  достигает уровня ТЭЦ и выше, несмотря на снижение отданной в сеть электрической энергии. Распределение потоков энергии в рассматриваемой комбинированной установке показано на рис. 1, б. Часть  $\mu$  выработанной в ПТУ электроэнергии используется на привод теплового насоса, перекачивающего тепловую энергию из низкопотенциального источника (конденсатора паровой турбины) в тепловую сеть.

В общем случае в ТН может быть использована только часть  $\beta$  сбросной теплоты парового цикла (теплоты, отведенной в конденсаторе):

$$\beta = N_{И} / N_{\text{конд}} \quad (4)$$

и часть  $\mu$ , выработанной ПТУ электроэнергии для его привода:

$$\mu = N_{\text{ТН}} / N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}}. \quad (5)$$

Для паровой турбины, работающей по циклу Ренкина, соотношение между ее мощностью и

мощностью теплового потока, сбрасываемого в конденсатор, определяется равенством:

$$\frac{N_{\text{конд}}}{N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}}} = \frac{Q_1 - H}{H} = \frac{\eta_k}{\eta_e} - 1, \quad (6)$$

где  $Q_1$  – теплота, подведенная к рабочему телу в паровом котле,

$H$  – теплоперепад, сработанный в ПТ,

$\eta_k = Q_1 / Q_{\text{топ}}$ ,  $\eta_e = H / Q_{\text{топ}}$  – соответственно КПД котла и эффективный КПД турбины,

$Q_{\text{топ}}$  – теплота сгорания топлива.

С учетом равенств (4) и (5), а также известного соотношения для ТН

$$N_{И} = (\varphi - 1) N_{\text{ТН}} \quad (7)$$

из равенства (6) можно получить уравнение, связывающее  $\mu$  и  $\beta$ :

$$\mu = \beta \frac{1}{\varphi - 1} \left( \frac{\eta_k}{\eta_e} - 1 \right). \quad (8)$$

Зависимость (8) представлена на рис. 3. Как видно, увеличение качества генерируемой теплоты (увеличение  $T_k$ ), а также увеличение доли полезно используемой сбросной теплоты паровой турбины  $\beta$  даже при условии  $T_k = \text{const}$  требует увеличения электрической мощности теплового насоса. При использовании всей теплоты, сбрасываемой в конденсатор, увеличение качества генерируемой теплоты ограничивается условием использования в ТН всей электроэнергии, производимой ПТУ. Этому условию  $\mu = \beta = 1$  соответствует применение в комбинированной установке теплового насоса с тепловым коэффициентом

$$\varphi_{\text{min}} = \eta_k / \eta_e. \quad (9)$$

Дальнейшее увеличение  $T_k$  относительно значения  $T_{k \text{ max}}$ , соответствующего  $\varphi_{\text{min}}$ , возможно либо за счет использования для привода ТН внешних дополнительных источников электроэнергии (этот вариант мы не рассматриваем), либо за счет снижения мощности генерирования теплоты при  $\mu = 1$ , что обуславливает экстремальный характер энергетических характеристик комбинированной установки. Рассмотрим их.

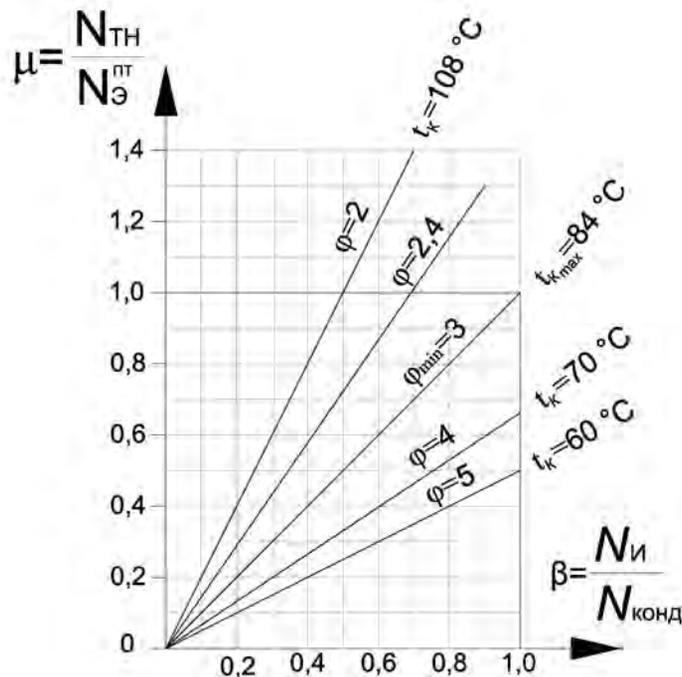


Рис. 3. Зависимость  $\mu = (\beta, \varphi)$  при условии  $\eta_k/\eta_e = 3, T_H = 20^\circ\text{C}$ .

В общем случае тепловая мощность, генерируемая тепловым насосом при использовании доли  $\beta$  от сбросной теплоты конденсатора турбины и соответствующей равенству (8) доли от генерируемой ПТУ электрической мощности, равна:

$$N_T = \beta N_{\text{конд}} + \mu N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}} \quad (10)$$

С учетом равенств (6) и (8)

$$N_T = N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}} \beta \frac{\varphi}{\varphi - 1} \left( \frac{\eta_k}{\eta_e} - 1 \right) = N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}} \mu \varphi \quad (11)$$

Электрическая мощность комбинированной установки, отдаваемая в сеть,

$$N_{\text{Э}}^{\text{С}} = N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}} - N_{\text{ТН}} = N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}} (1 - \mu) \quad (12)$$

Коэффициент полезного использования теплоты топлива установки с учетом рав. (8), (11) и (12)

$$K_{\text{ИТ}} = \frac{N_T + N_{\text{Э}}^{\text{С}}}{N_{\text{топ}}} = \eta_e + \beta(\eta_k - \eta_e) \quad (13)$$

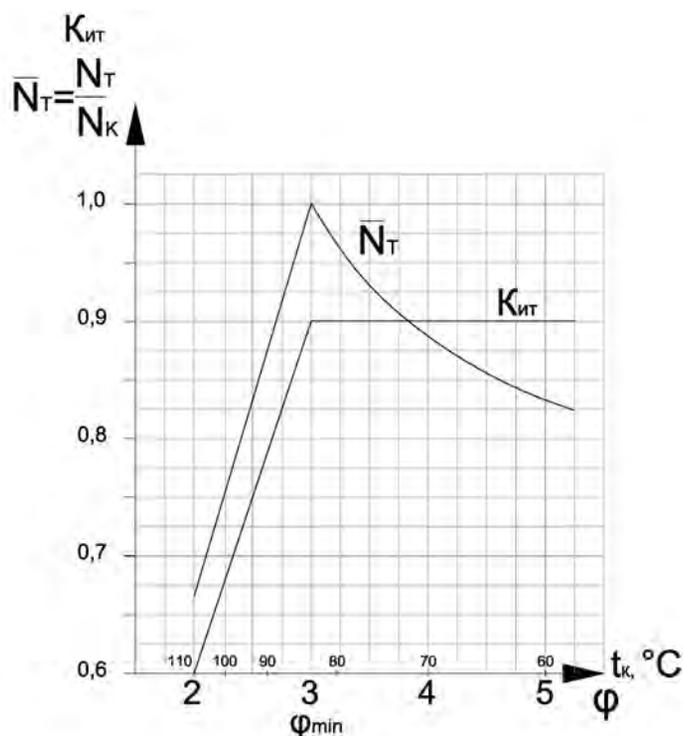
При  $\beta = 0$  комбинированная установка работает в режиме генерирования только электрической

энергии, т.е. ее  $N_T = 0$ , а  $K_{\text{ИТ}} = \eta_e$ . При  $\beta = 1$   $K_{\text{ИТ}} = \eta_k$  независимо от качества генерируемой теплоты, т.е. независимо от электрической мощности применяемого теплового насоса. Это объясняется тем, что в рассматриваемой схеме комбинированной установки тепловой насос не изменяет общее количество полезно выработанной энергии, т.к. его мощность  $N_{\text{ТН}}$  вычитается из мощности ПТУ и входит в качестве составляющей в мощность генерируемой теплоты. В то же время при увеличении  $\beta$  тепловая мощность комбинированной установки увеличивается при любом  $\varphi$  как за счет увеличения отбираемой из конденсатора теплоты, так и за счет увеличения мощности ТН (см. рис. 3), достигая при условии (9), как это следует из уравнения (10), максимального значения  $N_T = N_K$ . При режиме работы  $\mu = \beta = 1$  комбинированная установка по своей эффективности ( $K_{\text{ИТ}}$ ) и тепловой мощности  $N_T$  становится полностью адекватной паровому котлу, входящему в состав ПТУ, т.е. комбинированная (когенерационная) установка превращается в усложненный генератор теплоты, существенно превосходящий по своей стоимости простого теплогенерирующего котла.

Таким образом, наилучшие показатели рассматриваемой комбинированной установки достигаются при полном использовании сбросной теплоты паровой турбины (при  $\beta = 1$ ) и качестве генерируемой теплоты  $t_k$ , соответствующем условию (9).

Зависимость  $K_{\text{ИТ}}$  и  $N_T$  комбинированной установки от теплового коэффициента применяемого теплового насоса показана на рис. 4. Ее показатели при  $\varphi > \varphi_{\text{min}}$  соответствуют режимам работы  $\beta = 1 = \text{const}$  и  $\mu = \text{var}$ , а при  $\varphi < \varphi_{\text{min}}$  – режимам  $\mu = 1 = \text{const}$  и уменьшенным соответственно равенству (8) значениям  $\beta$ , что обуславливает снижение при этих режимах и  $N_T$  и  $K_{\text{ИТ}}$ .

Из вышесказанного следует, что реализация комбинированных установок с использованием ТН, имеющих  $\varphi < \varphi_{\text{min}}$ , лишена практического смысла, т.к. такие установки, работающие в режиме генераторов только теплоты,



**Рис. 4. Зависимость тепловой мощности и  $K_{ит}$  комбинированной установки от качества генерируемой тепловой энергии:  $\eta_k = 0,9$ ,  $\eta_e = 0,3$ ,  $t_H = 20$  °C,  $\beta = 1$ .**

намного дороже аналогичных по мощности и эффективности котлоагрегатов.

В установках, оснащенных тепловыми насосами с  $\phi > \phi_{min}$ , при режимах  $\beta = 1$ ,  $\mu < 1$  выработка теплоты становится меньшей, чем в эквивалентном по расходу топлива и эффективности котле. Однако, при этом вырабатывается также согласно равенству (12) товарная электроэнергия, т.е. установка работает в когенерационном режиме, благодаря чему коэффициент полезного использования теплоты топлива остается, как указывалось выше, максимально высоким  $K_{ит} = \eta_k$ .

В связи с тем, что для когенерационных схем установить распределение затрат топлива по видам генерируемой энергии затруднительно [3], оценим эффективность преобразования паросиловой установки в комбинированную путем определения прибыльности генерирования товарной энергии различного качества. Прибыльность комбинированной установки по отношению к базовой ПТУ будем

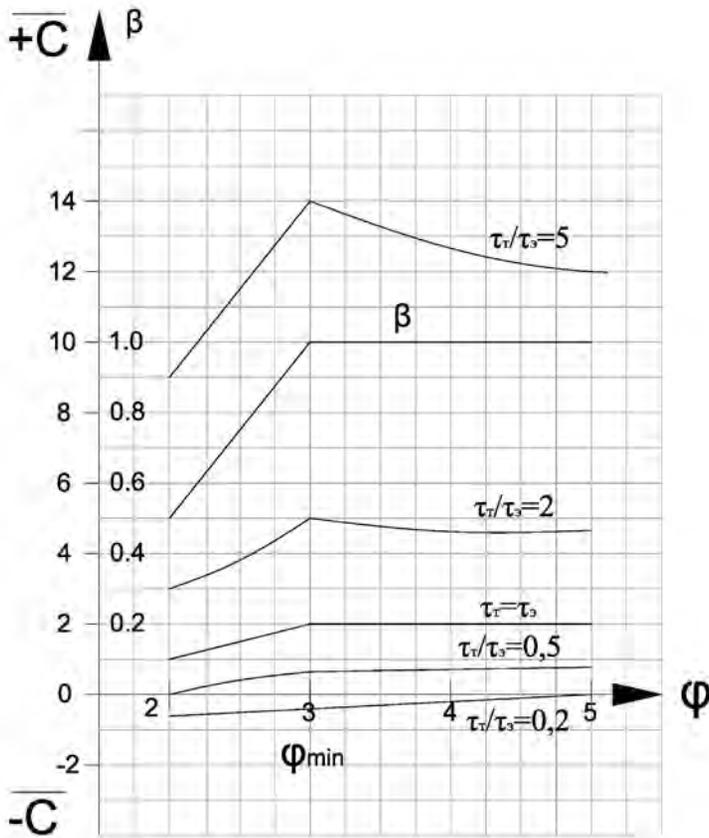
оценивать при помощи показателя  $\bar{C} = (C^k - C^{ПТУ})/C^{ПТУ}$ , где  $C^k$  — стоимость произведенной энергии в комбинированной установке, а  $C^{ПТУ}$  — в базовой (модернизируемой). При тарифе  $\tau_3$  [грн/(кВт·ч)] на электрическую энергию и  $\tau_T$  [грн/(кВт·ч)] на тепловую стоимость продукции паротурбинной установки будет составлять  $C^{ПТУ} = N_3^{ПТ} \cdot \tau_3$  [грн] а комбинированной  $C^k = N_3^C \cdot \tau_3 + N_T \cdot \tau_T$  [грн] за час работы. Следовательно, с учетом равенств (8)<sub>2</sub>, (11) и (12)

$$C^k = C^{ПТУ} \left[ 1 + \beta \frac{1}{\phi - 1} \left( \frac{\eta_k}{\eta_e} - 1 \right) \left( \phi \frac{\tau_T}{\tau_3} - 1 \right) \right], \text{ а}$$

$$\bar{C} = \frac{\beta}{\phi - 1} \left( \frac{\eta_k}{\eta_e} - 1 \right) \left( \phi \frac{\tau_T}{\tau_3} - 1 \right). \quad (14)$$

Зависимость (14) представлена на рис. 5. График построен для максимально возможных отборов теплоты из конденсатора турбины при каждом значении  $\phi$ , который может быть реализован. Как видим, прибыльность комбинированной установки слабо зависит от качества ( $T_k$ ) генерируемой теплоты в диапазоне  $\phi \geq \phi_{min}$  и практически полностью определяется соотношением тарифов на тепловую и электрическую энергии — чем выше стоимость тепловой энергии по отношению к электрической, тем большую прибыль комбинированная установка может обеспечить по сравнению с базовой даже в диапазоне  $\phi < \phi_{min}$ . В диапазоне тарифов  $\tau_T = (0,9 \dots 1,1) \tau_3$  (что близко к существующей ситуации), эффективность использования топлива в комбинированной установке по получаемой прибыли примерно в 2 раза превышает доход от продажи электроэнергии, выработанной базовой ПТУ при любом температурном уровне генерируемой тепловым насосом теплоты.

Представляет практический интерес сравнение показателей эффективности комбинированной установки с теплофикационной, выполненной, например, на базе противодавленной паровой турбины. Для этого следует предположить, что температура пара после турбины равна температуре в конденсаторе теплового насоса, т.е. температура пара за противодавленной турбиной по сравнению с



**Рис. 5. Зависимость от  $\phi$  прибыли от продажи выработанной комбинированной установкой энергии по сравнению с базовой ПТУ при использовании в ТН всей сбросной теплоты конденсатора:**

$$\phi_{min} = \eta_K / \eta_e, \quad \eta_K = 0,9, \quad \eta_e = 0,3$$

базовой конденсационной ПТУ должна быть повышена на величину  $\Delta t$ , равную повышению температуры теплоносителя в тепловом насосе. При этом увеличится теплосодержание питательной воды на величину  $\Delta i$  [ккал/кг] (численно равную  $\Delta t$  [°C]), в результате чего уменьшится теплота использованного топлива до величины  $(Q_1 - \Delta i) / \eta_K$ , где  $Q_1$  – теплота, подведенная к рабочему телу (пару) в паровом котле базовой конденсационной ПТУ. Вместе с этим теплосодержание пара за противодавленческой турбиной увеличится примерно на величину  $\Delta i / \eta_{oi}$ , а отведенная от пара теплота в процессе конденсации – на величину  $\Delta i / (\eta_{oi} - 1)$  по сравнению с конденсационной турбиной ( $\eta_{oi}$  – относительный внутренний

КПД турбины). При  $\Delta t = 30$  °C это увеличение не превышает 1 %. Поэтому можно считать, что отведенная от пара теплота при его конденсации как в комбинированной, так и в противодавленческой схеме – примерно одинаковы. Однако, по величине полезно выработанной тепловой и электрической энергии сравниваемые схемы существенно отличаются, хотя максимальный  $K_{ИТ}$  у них одинаков и равен  $\eta_K$ . В комбинированной схеме, как уже указывалось выше, полезно выработанная электроэнергия уменьшается на величину  $N_{ТН}$  по сравнению с базовой ПТУ, однако при этом тепловой эквивалент  $N_{ТН}$  прибавляется к теплоте, отбираемой из конденсатора турбины. Поэтому теплота, отдаваемая в сеть комбинированной установкой на величину  $N_{ТН}$  больше, теплоты отдаваемой в сеть противодавленческой установкой. В то же время снижение полезной электрической мощности противодавленческой турбины, вызванное уменьшением срабатываемого в ней теплоперепада, значительно меньше величины  $N_{ТН}$  и поэтому при одинаковом  $K_{ИТ}$  противодавленческая установка будет вырабатывать в суммарном продукте больше электрической и меньше тепловой энергии, чем комбинированная установка, при меньшей затрате топлива. Поэтому выбор той или иной схемы совместной выработки тепловой и электрической энергии будет определяться технико-экономическими расчетами когенерационных установок с учетом соотношения тарифов на вырабатываемые виды энергии.

В заключение следует сказать несколько слов о возможных путях реализации рассматриваемой комбинированной установки. Если в качестве рабочего тела для теплового насоса выбрать воду, то отпадает необходимость в испарителе для ТН – водяной пар с выхлопа паровой турбины попадает непосредственно в компрессор ТН, благодаря чему устраняется перепад температур теплоносителей в теплообменнике и температура «холодного» источника становится максимально возможной, тепловой коэффициент увеличивает-

ся, а затраты энергии на привод ТН – снижаются. Одновременно с этим давление за паровой турбиной снижается, что приводит к увеличению её мощности в результате эффективность комбинированной установки существенно повышается. Следует отметить, что тепловые насосы с водяным паром в качестве рабочего тела прошли успешные испытания на ТЭЦ-28 ОАО «Мосэнерго» [4].

Из приведенного выше анализа совместной работы паросиловой установки (ПСУ) с тепловым насосом, использующим генерируемую ПСУ электроэнергию и ее сбросную теплоту, следует:

1. Комбинированная энергетическая установка с тепловым насосом является одной из разновидностей когенерационных схем, в которых ТН выполняет роль своеобразного утилизатора низкопотенциальной сбросной теплоты базовой электрогенерирующей установки, производящего теплоту с затратами собственной электроэнергии установки. Поэтому производство товарной электроэнергии в комбинированной установке зависит от объемов и качества производимой теплоты, что отличает комбинированную установку от традиционной когенерационной (с котлом – утилизатором), электрическая мощность которой не зависит от тепловой нагрузки установки.

2. Комбинированная установка работает в качестве когенерационной только с тепловыми насосами, имеющими тепловой коэффициент  $\varphi > \eta_k/\eta_e$  где  $\eta_k$  – КПД котла, а  $\eta_e$  – эффективный КПД базовой ПТУ. При полном использовании сбросной теплоты ПТУ  $K_{ит}$  комбинированной установки не зависит от мощности применяемого ТН и равен КПД котла. При снижении  $\varphi$  тепловая мощность комбинированной установки увеличивается, достигая тепловой мощности котла при  $\varphi = \eta_k/\eta_e$ .

Однако при дальнейшем снижении  $\varphi < \eta_k/\eta_e$  установка товарную электроэнергию не вырабатывает, а ее  $K_{ит}$  резко уменьшается, т.е. она становится неконкурентноспособной по сравнению с обычным теплофикационным котлом.

3. Использование теплового насоса для повышения экономичности ПТУ, например, путем утилизации сбросной теплоты конденсатора в системе подогрева питательной воды котла, лишено практического смысла, т.к. повышение КПД установки не превышает 1 % абс. и наблюдается в ограниченном диапазоне температур питательной воды (примерно до 100 °С), а товарная электрическая мощность комбинированной установки снижается на величину  $N_{ТН}$  по сравнению с базовой ПТУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Клименко В.Н.* Некоторые особенности применения парокompрессионных тепловых насосов для утилизации сбросной теплоты отопительных котлов // Пром. теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 5. – С. 42-48.
2. *Софийский И.Ю., Мирошниченко С.Т.* Возможность использования теплонасосных технологий на АЭС //3б. наук. праць СНУЯЕ та П. – Севастополь. – 2009. – С. 58–61.
3. *Клименко В.Н., Мазур А.И., Сабашук П.П.* Когенерационные системы с тепловыми двигателями. Ч.1 – Общие вопросы когенерационных технологий. – Киев. – ИПЦ Алкон НАН Украины, 2008. – 560 с.
4. *Беляев В.Е., Косой А.С., Соколов Ю.Н.* Теплонасосные установки нового поколения и их использование в качестве высокоэффективной энергосберегающей и экологически чистой энерготехнологии для горячего водоснабжения // Новости теплоснабжения. – 2006, № 8. – С. 43–48.

Получено 14.03.2012 г.