

УДК 621. 577. 536

М. Н. Чепурной, к. т. н., доц.; С. И. Ткаченко, д. т. н., проф.; Н. В. Резидент, к. т. н.**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК**

Проанализирована энергетическая эффективность теплоснабжения от водогрейных котельных и парокompрессионных теплонасосных установок. Определены условия целесообразности применения теплонасосных установок.

Ключевые слова: теплонасосная установка, испаритель, компрессор, конденсатор, газотурбинная установка, котел-утилизатор.

Введение

В условиях подорожания органического топлива большое внимание уделяют использованию низкотемпературных источников теплоты в теплонасосных установках (ТНУ), которые используются для отопления, горячего водоснабжения, сушки и пр. Не менее важным фактором является универсальность ТНУ, которые одновременно можно использовать как нагреватели и охладители. По своей сути ТНУ являются средством транспортировки низкотемпературной теплоты из окружающей среды или другого источника на более высокий температурный уровень. Наиболее распространенными являются парокompрессионные ТНУ, состоящие из испарителя, компрессора, конденсатора и дроссельного устройства. В испарителе к рабочему телу ТНУ подводится низкотемпературная теплота Q_u . В компрессоре к рабочему телу подводится механическая энергия N , в результате чего из конденсатора отводится энергия $Q_k = Q_u + N$ с более высоким температурным уровнем. Эффективность работы ТНУ оценивают при помощи так называемого теплового (отопительного) коэффициента, представляющего соотношение:

$$\varphi = Q_k / N = (Q_u + N) / N. \quad (1)$$

Коэффициент φ входит в состав всех других показателей, характеризующих эффективность работы ТНУ. Он зависит от температуры рабочего тела в испарителе T_u , в конденсаторе T_k и коэффициента полезного действия компрессора $\eta_{км}$. Как известно [1, 2], потери энергии в приводе компрессора не входят в тепловую производительность ТНУ, а рассеиваются в окружающей среде.

Принято теплоснабжение от ТНУ рассматривать альтернативным теплоснабжению от водогрейных котельных. В каждом конкретном случае существует определенное значение φ , при котором энергетическая эффективность теплоснабжения от ТНУ превышает эффективность теплоснабжения от водогрейных котельных. Определение действительных (рабочих) значений φ дает возможность для заданной мощности теплоснабжения Q_k подбирать мощность компрессора ТНУ – N либо для заданной мощности низкотемпературного источника теплоты Q_u оценивать мощность теплоснабжения Q_k , т. е.

$$N = Q_k / \varphi; Q_k = \varphi \cdot Q_u / (\varphi - 1). \quad (2)$$

Принимая во внимание вышеизложенное, ставим задачу получить удобные инженерные соотношения для определения φ , а также способы оценки энергетической эффективности работы ТНУ по сравнению с работой водогрейных котельных.

Основные результаты

Экспериментальные данные, приведенные в [4, 5] в виде $\varphi = f(T_u, T_k, \eta_{км})$ с $\eta_{км} = 0,82$, для примера показаны на рис. 1.

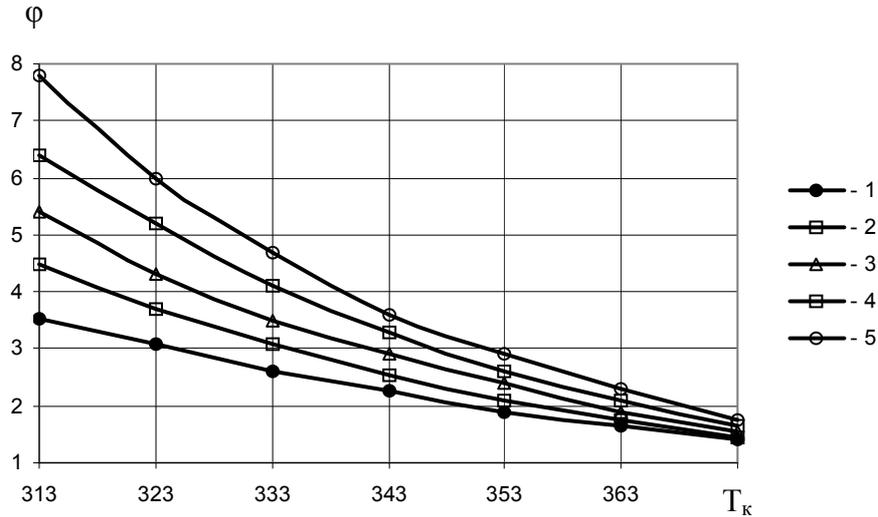


Рис. 1. Характер изменения отопительного коэффициента:
 1 – $T_u = 263$ К; 2 – 273; 3 – 283; 4 – 293; 5 – 303

На основании данных рис. 1 получена расчетная формула для определения коэффициентов φ :

$$\varphi = \exp(a - x \cdot T_k) \cdot C, \tag{3}$$

где значения a и x приведены на рис. 2, $C=0,4 \eta_{км} + 0,678$.

Соотношение (3) с точностью $\pm 4,17\%$ согласуется с экспериментальными данными.

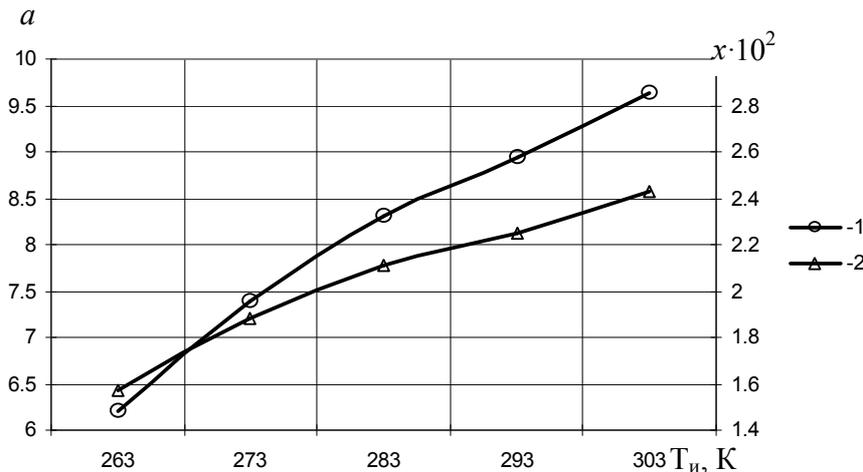


Рис. 2. Значения a (кривая 1) и x (кривая 2) в формуле (3)

Из приведенного рисунка видно, что более высокие значения φ соответствуют большим значениям T_u и меньшим значениям T_k . Иными словами, значения φ возрастают с уменьшением разницы температур $\Delta T = T_k - T_u$, что согласуется с [2, 3].

Сравнение энергетической эффективности теплоснабжения от водогрейной котельной и ТНУ осуществляют при одинаковой выработанной тепловой мощности Q_k , а также при условии, что теплоснабжение осуществляется на одну и ту же тепловую сеть. Расход условного топлива на водогрейный котел, который отпускает тепловую мощность Q_k , как известно, определяют по формуле, кг/с

$$B_{к0} = Q_k / (Q_y \cdot \eta_{к0}), \tag{4}$$

где $Q_y = 29,3$ МДж/кг – теплота сгорания условного топлива; $\eta_{к0}$ – коэффициент полезного действия (КПД) котла.

При наличии вентилятора для подачи воздуха в топку котла и дымососа для удаления продуктов сгорания топлива из котла из электросети потребляется общая мощность электроприводов вентилятора и дымососа (общая мощность тягодутьевых установок) N_{m0} . Этой мощности соответствует эквивалентный расход условного топлива на электростанциях энергосистемы, который равен кг/с

$$B_{m0} = N_{m0} / (Q_y \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{эм}), \tag{5}$$

где $\eta_{эс}$, $\eta_{эм}$ – средние значения КПД электростанции и электросетей соответственно.

Понятно, что общий расход условного топлива в котельной составит, кг/с

$$B_{кот} = B_{к0} + B_{m0}. \tag{6}$$

Расчеты B_{m0} показали, что эквивалентный расход условного топлива на привод тягодутьевых установок не превышает 1,15% от расхода топлива на котел при условии $\eta_{эс} = 0,34$ и $\eta_{эм} = 0,9$. Последние значения определены по данным «Статистического щорічника України за 2011 рік». Увеличение расхода топлива на B_{m0} обуславливает уменьшение КПД котлов на такой же процент, т. е. $\eta_k = \eta_{к0} - 0,015$. Это дает возможность определять расход условного топлива непосредственно по (4) при $\eta_{к0} = \eta_k$.

В ТНУ с электроприводом компрессора электрическая мощность N потребляется из электросети. Этой мощности соответствует эквивалентный расход условного топлива на электростанциях энергосистемы, кг/с

$$B_э = N / (Q_y \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{эм}) = Q_k / (Q_y \cdot \varphi \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{эм}). \tag{7}$$

Экономия или перерасход условного топлива на ТНУ по сравнению с котельной будет равен, т/час

$$\Delta B = 3,6(B_{кот} - B_э) = \frac{3,6 \cdot Q_k}{Q_y} \left(\frac{1}{\eta_k} - \frac{1}{\varphi \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{эм}} \right). \tag{8}$$

Понятно, что экономию условного топлива можно получить при условии $1/\eta_k > 1/(\varphi \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{эм})$, которое соответствует неравенству

$$\varphi > \eta_k / (\eta_{эс} \cdot \eta_{эм}). \tag{9}$$

Выражение (9) согласуется с [3], где этот результат получен иным путем. На рис. 3 показаны зависимости изменения величины экономии условного топлива при условии: $Q_k = 1$ МВт; $\eta_{эс} = 0,34$ и $\eta_{эм} = 0,9$.

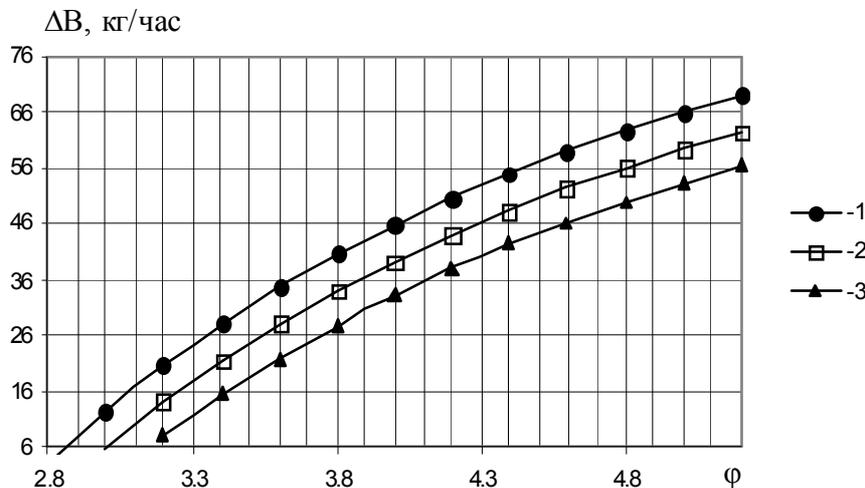


Рис. 3 Зависимости $\Delta B = f(\varphi, \eta_k)$: 1 – $\eta_k = 0,84$; 2 – $0,88$; 3 – $0,92$.

Из рис. 3 наглядно видно, что наибольшее влияние на величину экономии топлива оказывают именно значения φ . При определенных условиях экономия условного топлива на ТНУ может достигать до 60 кг/час.

Известно [6], что энергетическую эффективность работы тепловых установок целесообразно оценивать при помощи удельных расходов условного топлива, которые представляют собой отношения расходов условного топлива к величине выработанной энергии (в нашем случае к величине Q_k). На основании (4) и (7) нетрудно определить, кг/МДж

$$b_k = B_{ком} / Q_k = 1 / (Q_y \cdot \eta_k), \tag{10}$$

$$b_y = b_{ТНУ} = B_y / Q_k = 1 / (Q_y \cdot \varphi \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{эм}), \tag{11}$$

Относительная величина удельного расхода условного топлива, представленная в процентах, должна характеризовать энергетическую эффективность или неэффективность работы ТНУ по сравнению с котельной, т. е.

$$b_* = \frac{b_k - b_{ТНУ}}{b_k} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\eta_k}{\varphi \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{эм}} \right) \cdot 100. \tag{12}$$

Если $b_* = 0$, то расход условного топлива в котельной равен эквивалентному расходу топлива в энергосистеме на электропривод компрессора ТНУ. Положительные значения b_* характеризуют процентную экономию топлива на ТНУ, а отрицательные – наоборот перерасход. Для упрощения расчетов построена номограмма, приведенная на рис. 4.

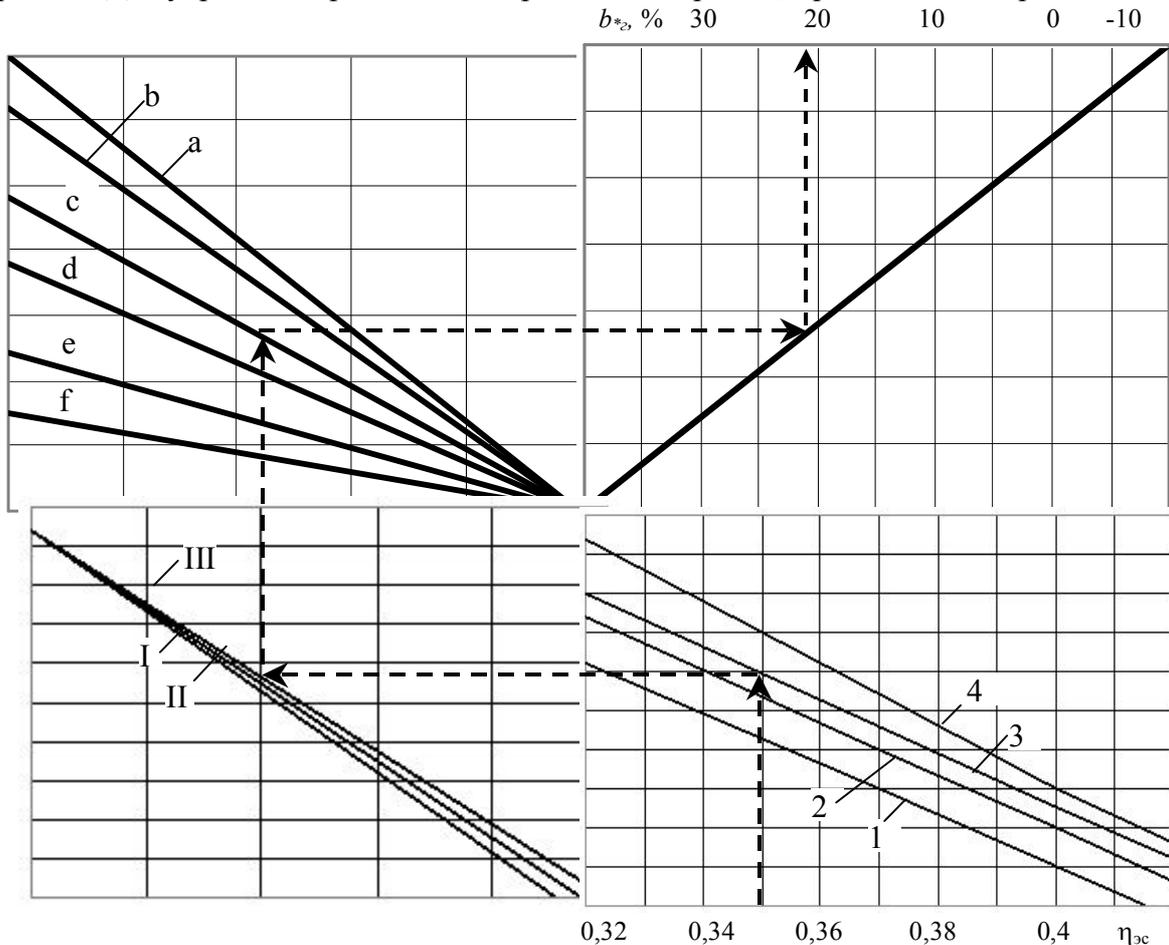


Рис. 4. Номограмма для определения b_* : 1 – $1 - \eta_k = 0,84$; 2 – 0,88; 3 – 0,9; 4 – 0,94; I – $\eta_{эм} = 0,88$; II – 0,9; III – 0,94; a – $\varphi = 2,6$; b – 3; c – 3,5; d – 4; e – 5; f – 6

Из рис. 4 видно, что наибольшее влияние на величину b_* оказывают значения φ и $\eta_{эс}$.

Рассмотрим теперь экономический аспект применения ТНУ вместо водогрейной котельной.

Расход условного топлива в котельной, т/час

$$B_{кот} = \frac{3,6 \cdot Q_{кот}}{Q_y \cdot \eta_{кот}} = \frac{3,6 \cdot Q_{кот}}{29,3 \cdot \eta_{кот}} = 0,123 \frac{Q_{кот}}{\eta_{кот}}. \quad (13)$$

Часовая стоимость топлива, сожженного в котельной, грн.

$$Z_{кот} = B_{кот} \cdot C_m \cdot \tau = 0,123 \cdot Q_{кот} \cdot C_m \cdot 1/\eta_{кот}, \quad (14)$$

где C_m – цена условного топлива, грн./т.

Часовая стоимость потребляемой компрессором ТНУ электроэнергии, грн.

$$Z_{ТНУ} = N \cdot C_э \cdot \tau = Q_к \cdot C_э \cdot 1/\varphi, \quad (15)$$

где $C_э$ – цена электроэнергии, грн./(МВт·час).

Относительная часовая стоимость энергоносителей, %

$$W = \left(\frac{Z_к}{Z_{ТНУ}} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{0,123 \varphi S}{\eta_к} - 1 \right) \cdot 100 = (H - 1) \cdot 100, \quad (16)$$

где $S = C_m / C_э$.

Если $W = 0$, то расход денег на энергоносители в котельной и ТНУ одинаковы. Положительные значения W характеризуют процентный перерасход средств в котельной, а отрицательные – в ТНУ. Из (16) видно, что основными показателями, влияющими на величину W , являются φ и S . Характер влияния этих величин на комплекс H в (16) для $\eta_к = 0,9$ показан на рис. 5.

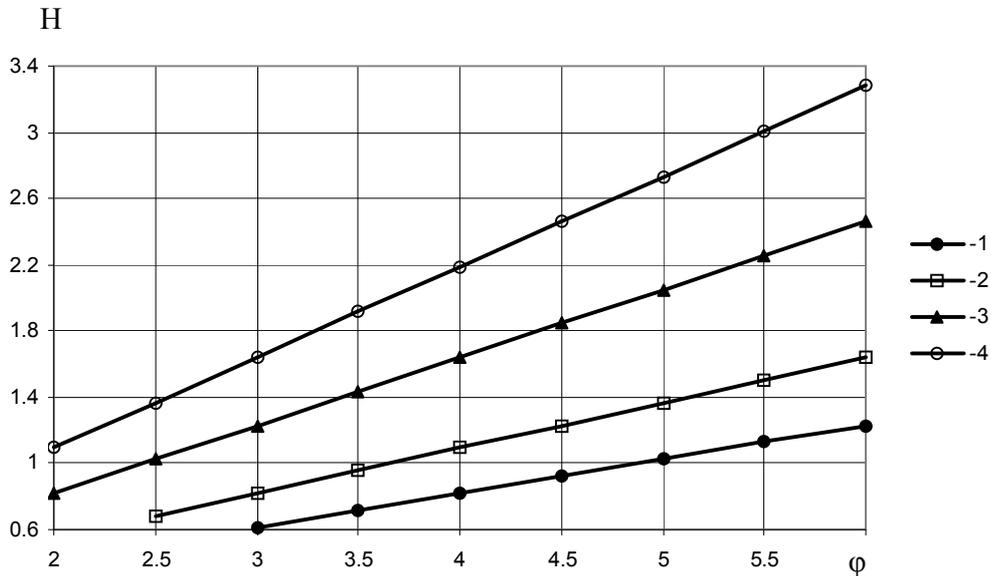


Рис. 5. Зависимости $H = f(\varphi, S)$: 1 – $S = 1,5$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

Экономическая эффективность использования средств на энергоносители в ТНУ возрастает при увеличении φ и цены на топливо. Отметим, что цена на электроэнергию растет медленнее, чем цена на топливо. Это обстоятельство должно способствовать более широкому внедрению ТНУ. Но, в случае низких цен на топливо, граничные значения $\varphi_{эп}$, при которых $H > 1$ и $W > 0$, возрастают. Из рис. 4 видно, что при $S = 1,5$ $\varphi_{эп} > 5$. Отметим, что величина W по сути является индикатором экономической составляющей

применения ТНУ, поскольку характеризует лишь затраты на энергоносители. Она является необходимым дополнением (12). Так, например, из рис. 5 видно, что экономическая составляющая эффективности применения ТНУ для $S=2$ будет в случае $\varphi > 3,6$, а энергетическая, по (12), – в случае $\varphi = 3$. В связи с этим обращаем внимание на то, что повышение энергетической эффективности ТНУ не всегда может быть гарантией ее экономической эффективности.

Одним из методов повышения энергетической эффективности работы ТНУ является применение газовых двигателей для привода компрессора [7]. Сравним теперь эффективность теплоснабжения от водогрейной котельной и ТНУ с приводом компрессора от газовой турбины. Для определенной газотурбинной установки (ГТУ) всегда известны ее паспортные данные: полезная мощность – N_z , коэффициент полезного действия – η_z , температура отработанных в ГТУ газов – t_{oz} . Из-за высоких значений t_{oz} ГТУ оснащают котлом-утилизатором, в котором за счет охлаждения отработанных газов до температуры t_{ky} подогревается обратная сетевая вода системы теплоснабжения.

Сравнивать эффективность теплоснабжения от котельной и ТНУ с газотурбинным приводом компрессора можно либо при условии одинаковой тепловой мощности Q_k , либо при условии, что полезная мощность ГТУ равна необходимой мощности привода компрессора ТНУ. Сравнение по первому варианту связано с трудностями подбора ГТУ, поскольку неизвестно соотношение между тепловыми мощностями конденсатора ТНУ и котла-утилизатора. Учитывая это, выбираем ГТУ, полезная мощность которой будет равна мощности компрессора, т. е. $N_z = N$.

Расход условного топлива на ГТУ, кг/с

$$B_z = N_z / (\eta_y \cdot \eta_z) \quad (17)$$

Мощность отработанных в ГТУ газов

$$Q_{oz} = (1 - \eta_z) N_z / \eta_z \quad (18)$$

Коэффициент утилизации теплоты отработанных в ГТУ газов в котле-утилизаторе [7]

$$\psi = \frac{t_{oz} - t_{ky}}{t_{oz} - t_{oc}}, \quad (19)$$

где t_{oc} – температура окружающей среды, которая в соответствии с международными правилами равна 15°C .

Тепловая мощность котла-утилизатора

$$Q_{ky} = Q_{oz} \cdot \psi = (1 - \eta_z) \cdot N_z \cdot \psi / \eta_z = \gamma \cdot N_z \quad (20)$$

Тепловая мощность конденсатора ТНУ с определенным значением отопительного коэффициента

$$Q_k = \varphi \cdot N_z \quad (21)$$

Суммарная тепловая мощность ТНУ с газотурбинным приводом компрессора

$$Q_c = Q_{ky} + Q_k = N_z \cdot (\gamma + \varphi) \quad (22)$$

Подобно (8), формула для экономии или перерасхода условного топлива будет иметь вид

$$\Delta B_z = 3,6 \cdot Q_c / Q_y \cdot [1 / \eta_{ком} - 1 / (\eta_z \cdot \varphi)] \quad (23)$$

Понятно, что экономия условного топлива на ТНУ достигается при условии $\eta_{ком} < \eta_z \cdot \varphi$. Она возрастает при уменьшении $\eta_{ком}$ и при увеличении η_z и φ . Характер зависимостей

$\Delta B_z = f[(\eta_z \cdot \varphi), \eta_{ком}]$ подобен зависимостям, приведенным на рис. 3.

Удельный расход условного топлива на выработку теплоты, кг/МДж

$$b_z = B_z / Q_c = 1 / \eta_z \cdot (\gamma + \varphi) Q_y. \tag{24}$$

Удельный расход условного топлива в котельной определяют по (10). Тогда относительная величина удельного расхода условного топлива будет равна, %

$$b_{*z} = \frac{b_{ком} - b_z}{b_{ком}} \cdot 100 = \left[1 - \frac{\eta_{ком}}{\eta_z \cdot (\gamma + \varphi)} \right] \cdot 100. \tag{25}$$

Здесь, как и в (12), положительные значения b_{*z} характеризуют перерасход условного топлива в котельной. Для удобства определения b_{*z} построена номограмма, показанная на рис. 6.

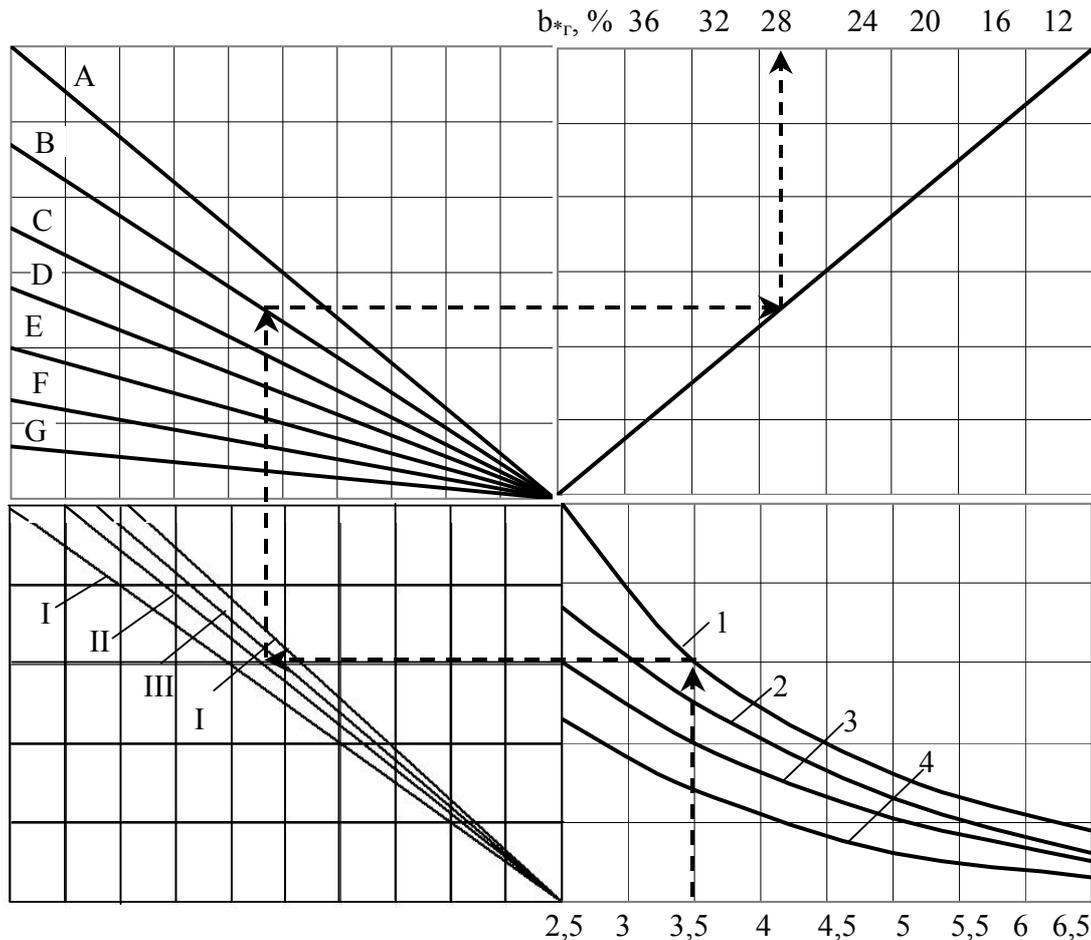


Рис. 6. Номограмма для определения относительного удельного расхода условного топлива на ТНУ с газотурбинным приводом компрессора: 1 – $\gamma = 1,0$; 2 – 1,4; 3 – 2; 4 – 2,6; I – $\eta_{ком} = 0,94$; II – 0,9; III – 0,85; IV – 0,8; A – $\eta_z = 0,3$; B – 0,32; C – 0,34; D – 0,36; F – 0,4; G – 0,42

Из номограммы видно, что наибольшее влияние на величину b_{*z} оказывают отопительный коэффициент ТНУ и КПД газотурбинной установки. С увеличением этих величин повышается эффективность применения ТНУ с газотурбинным приводом компрессора. Сравнивая (12) и (25), видим, что при одинаковых значениях $\eta_{ком}$ и φ и при условии $\eta_{эс} \approx \eta_z$ энергетическая эффективность ТНУ с газотурбинным приводом компрессора выше эффективности ТНУ с электроприводом компрессора, поскольку $\eta_{эм} < 1$, а $\gamma \geq 1$. В этом нетрудно убедиться. Пусть задано: $\eta_{ком} < 0,9$; $\varphi = 3,2$; $\eta_{эс} = 0,34$; $\eta_{эм} = 0,9$;

$\eta_2 = 0,32 < \eta_{эс}; \gamma = 1$. Тогда расчеты b_* по (12) и b_{*2} по (25) дают: $b_* = 8,09\%$, $b_{*2} = 33\%$.

При работе ТНУ с газотурбинным приводом компрессора и в ГТУ, и в котельной сжигается условное топливо по одной цене. Принимая во внимание (13), (14), (16) и (17), получим выражение для определения часового относительного расхода условного топлива, %

$$W_2 = \left(\frac{Z_{ком}}{Z_{ТНУ}} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{\eta_2 \varphi}{\eta_{ком}} - 1 \right) \cdot 100. \quad (26)$$

Сравнивая (25) и (26), можно увидеть, что и в этом случае показатель энергетической эффективности превышает значение индикатора экономического использования энергоносителей. Перерасход на топливо в котельной тем больше, чем меньше $\eta_{ком}$ и больше значения η_2 и φ , что подтверждает (23). Если, например, $\eta_2 = 0,34$, а $\eta_{ком} = 0,9$, то граничное значение отопительного коэффициента, при котором наблюдается уменьшение затрат на топливо, равно $\varphi_{зр} = 2,8$.

Обращаем внимание, что решение о целесообразности использования ТНУ в каждом конкретном случае необходимо принимать на основе детальных технико-экономических расчетов, поскольку известно, что удельная стоимость ТНУ, а тем более ГТУ, значительно превышает стоимость котельного оборудования. Кроме того, единичная мощность ТНУ ограничена и не превышает 5 – 6 МВт.

Выводы

1. Проанализированы особенности работы теплонасосных установок с электро- и газотурбинным приводом компрессора.
2. Получены удобные формулы и построены номограммы для определения эффективности работы ТНУ по сравнению с работой отопительных котельных.
3. Определены условия и пределы изменения основных характеристик ТНУ, а также влияния соотношений цен на энергоносители, при которых достигается повышение эффективности ТНУ и экономия топлива на 20% и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чепурний М. М. Аналіз впливу температур на ефективність роботи теплонасосних установок / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, Т. П. Куть // Вісник ВПІ, 2001. – № 4. – С. 53 – 56.
2. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов / Т. В. Морозюк. – Одесса: Неогоциант, 2006. – 712 с.
3. Бэр Г. Д. Техническая термодинамика / Г. Д. Бэр. – М.: Мир, 1977. – 318 с.
4. Пустовалов Ю. В. Исследование эффективности парокомпрессионных теплонасосных станций в системах энергоснабжения городов / Ю. В. Пустовалов. – М.: ВНИИцентр, 1989. – 179 с.
5. Клименко В. Н. некоторые особенности применения тепловых насосов для утилизации сбросной теплоты отопительных котлов / В. Н. Клименко // Промышленная теплотехника, 2011. – т. 33. – № 5. – С. 42 – 48.
6. Порівняння енергоефективності систем теплопостачання від опалювальних котельні і теплонасосних установок [Електронний ресурс] / М. М. Чепурний, О. В. Куцак, І. М. Димніч // Наукові праці ВНТУ. – № 4. – 2011. Режим доступу до журн.: http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_4/2011-4.files/uk/11mnchpp_ua.pdf.
7. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.

Чепурной Марк Николаевич – к. т. н., доцент, профессор кафедры теплоэнергетики.

Ткаченко Станислав Иосифович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики.

Резидент Наталия Владимировна – к. т. н., старший преподаватель кафедры теплоэнергетики. Винницкий национальный технический университет.