

УДК 621. 577. 536

М. М. Чепурний, к. т. н., доц.; С. Й. Ткаченко, д. т. н., проф.;
Н. В. Резидент, к. т. н.

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОАСОСНИХ УСТАНОВОК

Проаналізовано енергетичну ефективність теплопостачання від водогрійних котелень і парокомпресійних теплоасосних установок. Визначено умови доцільності застосування теплоасосних установок.

Ключові слова: теплоасосна установка, випарник, компресор, конденсатор, газотурбінна установка, котел-утилізатор.

Вступ

За умови подорожчання органічного палива велику увагу приділяють використанню низькотемпературних джерел теплоти в теплоасосних установках (ТНУ), які використовують для опалення, гарячого водопостачання, сушіння тощо. Не менш важливим чинником є універсальність ТНУ, які одночасно можна використовувати як нагрівачі та охолодники. За своєю суттю ТНУ є засобом транспортування низькотемпературної теплоти із навколишнього середовища або з іншого джерела на більш високий температурний рівень. Найпоширенішими є парокомпресійні ТНУ, які складаються з випарника, компресора, конденсатора та дросельного пристрою. У випарнику до робочого тіла ТНУ підводиться низькотемпературна теплота Q_g . У компресорі до робочого тіла підводиться механічна енергія N , у результаті чого із конденсатора відводиться енергія $Q_k = Q_g + N$ з більш високим температурним рівнем. Ефективність роботи ТНУ оцінюють за допомогою так званого теплового (опалювального) коефіцієнта, який являє собою співвідношення:

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

Коефіцієнт φ входить до складу всіх інших показників, які характеризують ефективність роботи ТНУ. Він залежить від температури робочого тіла у випарнику T_g , у конденсаторі T_k і коефіцієнта корисної дії компресора $\eta_{км}$. Як відомо [1, 2], втрати енергії у приводі компресора не входять у теплову видатність ТНУ, а розсіюються в навколишньому середовищі.

Прийнято теплопостачання від ТНУ розглядати альтернативним теплопостачанням від водогрійних котелень. У кожному конкретному випадку існує певне значення φ , за якого енергетична ефективність теплопостачання від ТНУ перевищує ефективність теплопостачання від водогрійних котелень. Визначення дійсних (робочих) значень φ дає змогу для заданої потужності теплопостачання Q_k підбирати потужність компресора ТНУ – N або для заданої потужності низькотемпературного джерела теплоти Q_g оцінювати потужність теплопостачання Q_k , тобто

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

Зважаючи на вищевикладене, ставимо задачу отримати зручні інженерні співвідношення для визначення φ , а також засоби оцінки енергетичної ефективності роботи ТНУ порівняно з роботою водогрійних котелень.

Основні результати

Дослідні дані, наведені в [4, 5] у вигляді $\varphi = f(T_g, T_k, \eta_{км})$ з $\eta_{км} = 0,82$, для прикладу показані на рис. 1.

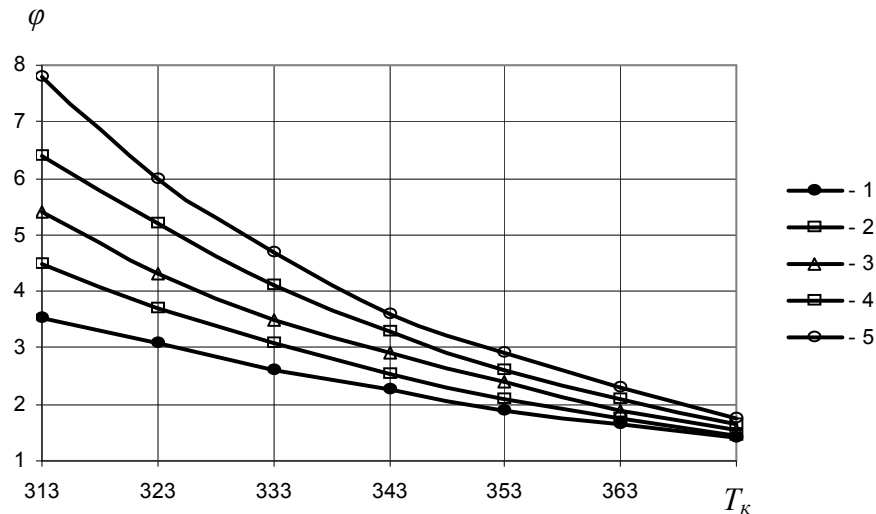


Рис. 1. Характер зміни опалювального коефіцієнта:
1 – $T_g = 263$ К; 2 – 273; 3 – 283; 4 – 293; 5 – 303

На підставі даних рис. 1 отримано узагальнену розрахункову формулу для визначення коефіцієнтів φ :

$$\varphi = \exp(a - x \cdot T_k) \cdot C, \quad (3)$$

де значення a і x наведено на рис. 2, $C = 0,4 \eta_{км} + 0,678$.

Співвідношення (3) з точністю $\pm 4,17\%$ узгоджується з експериментальними даними.

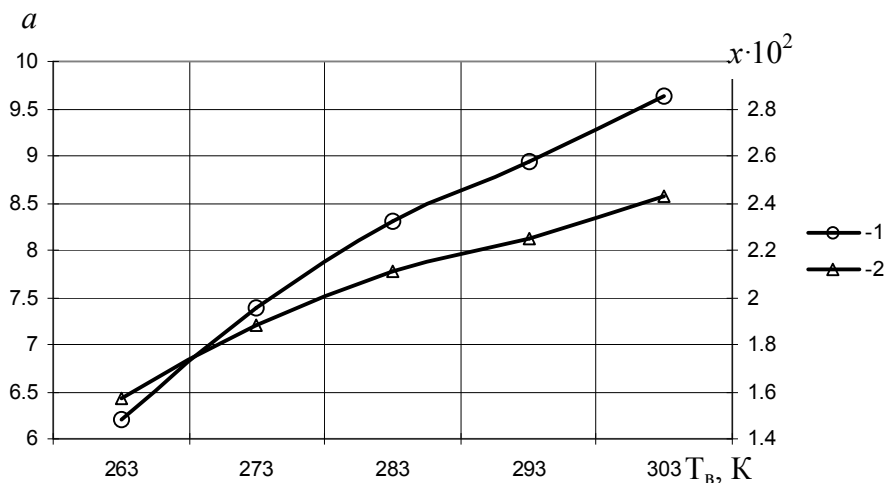


Рис. 2. Значення a (крива 1) і x (крива 2) у формулі (3)

Із наведеного рисунка видно, що більш високі значення φ відповідають більшим значенням T_g і меншим значенням T_k . Іншими словами, значення φ зростають зі зменшенням різниці температур $\Delta T = T_k - T_g$, що узгоджується з [2, 3].

Порівняння енергетичної ефективності теплопостачання від водогрійної котельні та ТНУ здійснюють для однакової виробленої теплової потужності Q_k , а також за умови, що теплопостачання здійснюють на одну й ту саму теплову мережу. Витрата умовного палива на водогрійний котел, який відпускає теплову потужність Q_k , як відомо, визначають за

формулою, кг/с

$$B_{\kappa 0} = Q_{\kappa} / (Q_y \cdot \eta_{\kappa 0}), \quad (4)$$

де $Q_y = 29,3$ МДж/кг – теплота згорання умовного палива; $\eta_{\kappa 0}$ – коефіцієнт корисної дії (ККД) котла.

За наявності вентилятора для подачі повітря в топку котла та димососа для видалення продуктів згорання палива із котла з електромережі споживається загальна потужність електроприводів вентилятора та димотяга (загальна потужність тягодуттєвих установок) N_{m0} . Цій потужності відповідає еквівалентна витрата умовного палива на електростанціях енергосистеми, яка дорівнює, кг/с

$$B_{m0} = N_{m0} / (Q_y \cdot \eta_{ec} \cdot \eta_{em}), \quad (5)$$

де η_{ec} , η_{em} – середнє значення ККД електростанції та електромереж відповідно.

Зрозуміло, що загальна витрата умовного палива в котельні складатиме, кг/с

$$B_{\text{кот}} = B_{\kappa 0} + B_{m0}. \quad (6)$$

Розрахунки B_{m0} показали, що еквівалентна витрата умовного палива на привід тягодуттєвих установок не перевищує 1,15% від витрати палива на котел за умови $\eta_{ec} = 0,34$ і $\eta_{em} = 0,9$. Останні значення визначені за даними «Статистичного щорічника України за 2011 рік». Збільшення витрати палива на B_{m0} зумовлює зменшення ККД котлів на такий самий відсоток, тобто $\eta_{\kappa} = \eta_{\kappa 0} - 0,015$. Це дає змогу визначати витрату умовного палива безпосередньо за (4) за $\eta_{\kappa 0} = \eta_{\kappa}$.

У ТНУ з електроприводом компресора електрична потужність N споживається з електромережі. Цій потужності відповідає еквівалентна витрата умовного палива на електростанціях енергосистеми, кг/с

$$B_e = N / (Q_y \cdot \eta_{ec} \cdot \eta_{em}) = Q_{\kappa} / (Q_y \cdot \varphi \cdot \eta_{ec} \cdot \eta_{em}). \quad (7)$$

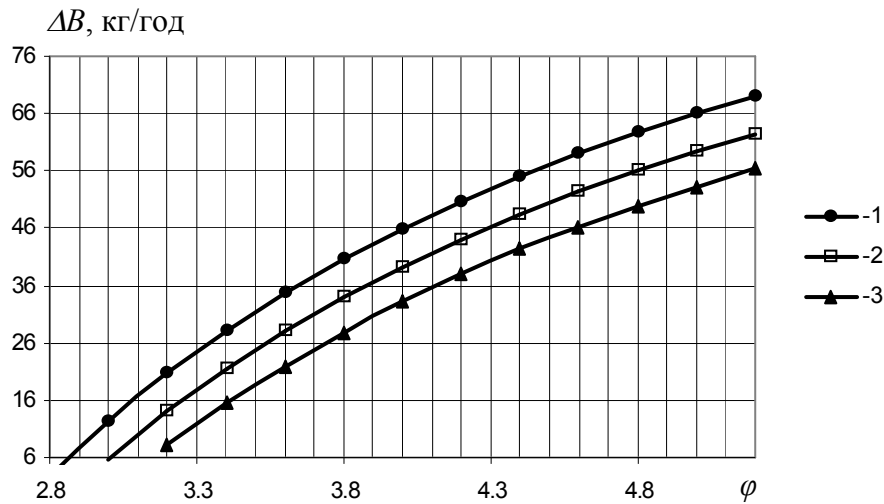
Економія або перевитрата умовного палива на ТНУ порівняно з котельнею дорівнюватиме, т/год

$$\Delta B = 3,6(B_{\text{кот}} - B_e) = \frac{3,6 \cdot Q_{\kappa}}{Q_y} \left(\frac{1}{\eta_{\kappa}} - \frac{1}{\varphi \cdot \eta_{ec} \cdot \eta_{em}} \right). \quad (8)$$

Зрозуміло, що економію умовного палива можна отримати за умови $1/\eta_{\kappa} > 1/(\varphi \cdot \eta_{ec} \cdot \eta_{em})$, яка відповідає нерівності

$$\varphi > \eta_{\kappa} / (\eta_{ec} \cdot \eta_{em}). \quad (9)$$

Вираз (9) узгоджується з [3], де цей результат отримано іншим шляхом. На рис. 3 показані залежності зміни величини економії умовного палива за умови: $Q_{\kappa} = 1$ МВт; $\eta_{ec} = 0,34$ і $\eta_{em} = 0,9$.

Рис. 3. Залежності $\Delta B = f(\varphi, \eta_{\kappa})$: 1 – $\eta_{\kappa} = 0,84$; 2 – $0,88$; 3 – $0,92$

Із рис. 3 наочно видно, що найбільше впливає на величину економії палива має саме значення φ . За певних умов економія палива на ТНУ може сягати 60 кг/год.

Відомо [6], що енергетичну ефективність роботи теплових установок доцільно оцінювати за допомогою питомих витрат умовного палива, які являють собою відношення витрати умовного палива до величини виробленої енергії (у нашому випадку до величини Q_{κ}). На підставі (4) і (7) неважко визначити, кг/МДж

$$b_{\kappa} = B_{\text{ком}} / Q_{\kappa} = 1 / (Q_y \cdot \eta_{\kappa}), \quad (10)$$

$$b_e = b_{\text{ТНУ}} = B_e / Q_{\kappa} = 1 / (Q_y \cdot \varphi \cdot \eta_{ec} \cdot \eta_{em}). \quad (11)$$

Відносна величина питомої витрати умовного палива, подана у відсотках, має характеризувати енергетичну ефективність або неефективність роботи ТНУ порівняно з роботою котельні, тобто

$$b_* = \frac{b_{\kappa} - b_{\text{ТНУ}}}{b_{\kappa}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\eta_{\kappa}}{\varphi \cdot \eta_{ec} \cdot \eta_{em}} \right) \cdot 100. \quad (12)$$

Якщо $b_* = 0$, то витрата палива в котельні дорівнює еквівалентній витраті палива в енергосистемі на електропривод компресора ТНУ. Додатне значення b_* характеризує відсоткову економію палива на ТНУ, а від'ємні – навпаки перевитрату. Для спрощення розрахунків побудовано номограму, яку наведено на рис. 4.

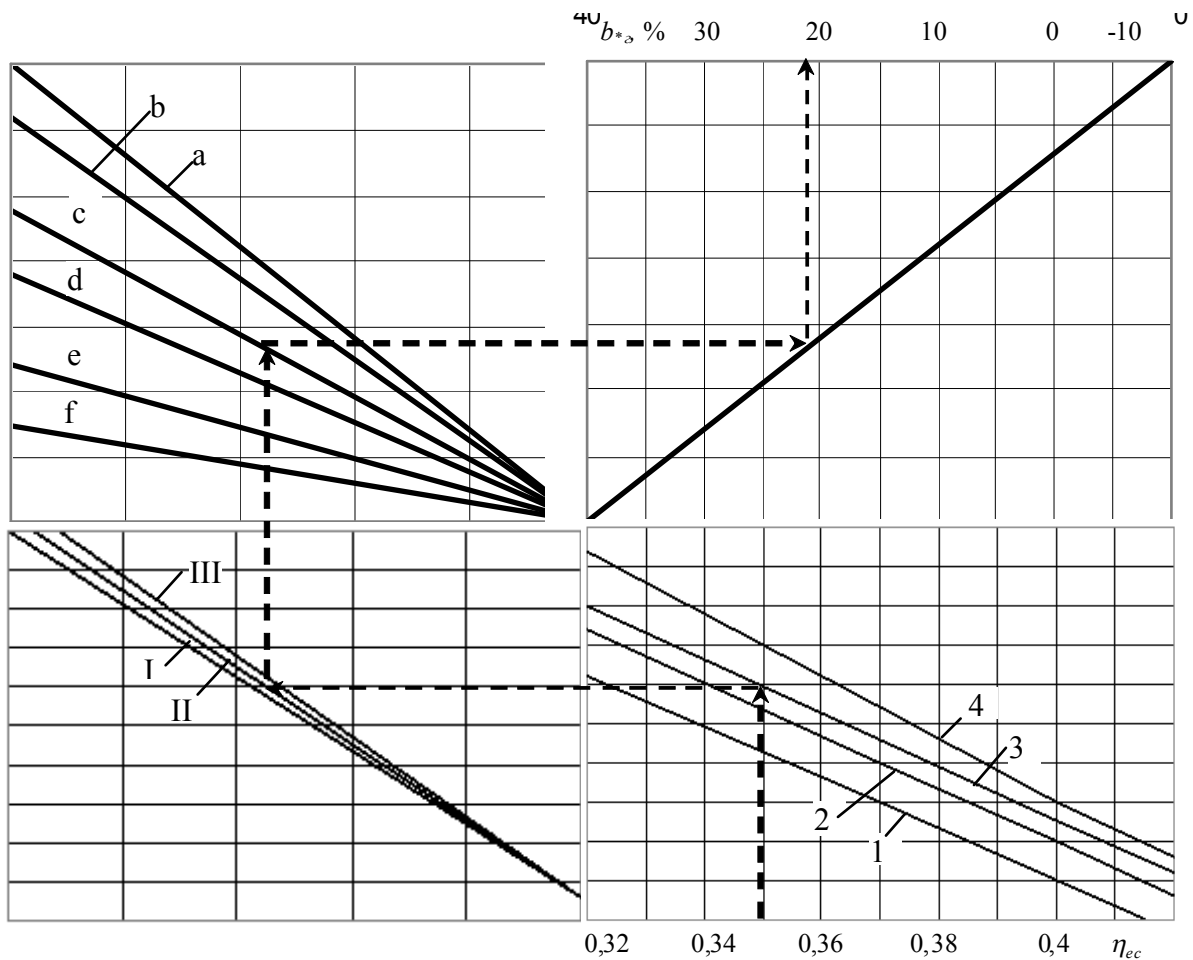


Рис. 4. Номограма для визначення b_* : 1 – $\eta_{кот} = 0,84$; 2 – 0,88; 3 – 0,9; 4 – 0,94; I – $\eta_{ем} = 0,88$; II – 0,9; III – 0,94;
 $a - \varphi = 2,6$; $b - 3$; $c - 3,5$; $d - 4$; $e - 5$; $f - 6$

Із рис. 4 видно, що найбільше впливає на величину b_* має значення φ і η_{ec} .

Розглянемо тепер економічний ефект застосування ТНУ замість водогрійної котельні.

Витрата умовного палива в котельні, т/год

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

Годинна вартість палива, спаленого в котельні, грн.

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

де C_n – ціна умовного палива, грн./т.

Годинна вартість споживаної компресором ТНУ електроенергії, грн.

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

де C_e – ціна електроенергії, грн./(МВт·год).

Відносна годинна вартість енергоносіїв, %

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

де $S = C_n / C_e$.

Якщо $W=0$, то витрата коштів на енергоносії в котельні та ТНУ однакові. Додатні значення W характеризують відсоткові перевитрати коштів у котельні, а від'ємні – у ТНУ. Із (16) видно, що основними чинниками, які впливають на величину W є φ і S . Характер впливу цих величин на комплекс H у (16) для $\eta_k=0,9$ показаний на рис. 5.

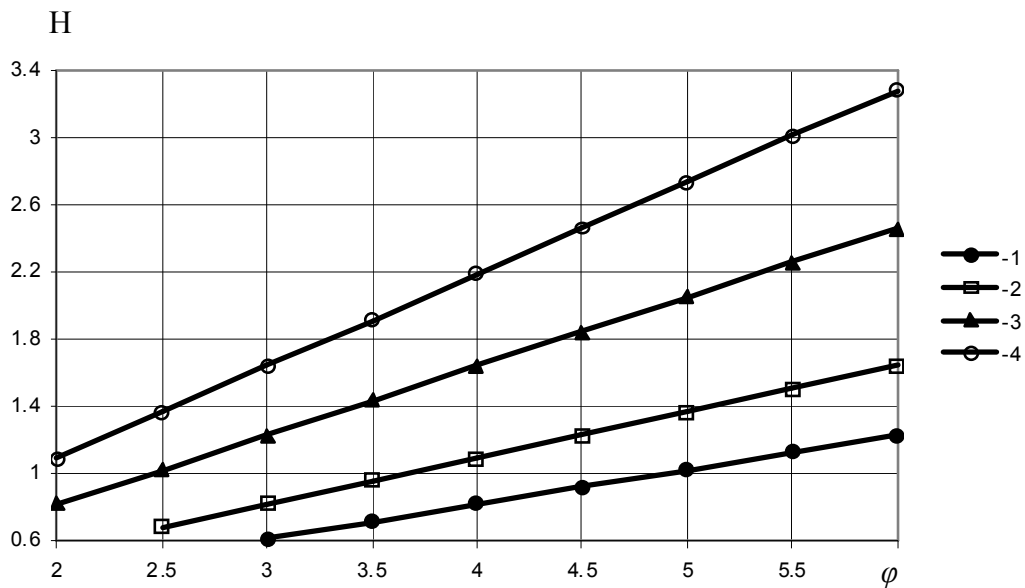


Рис. 5. Залежності $H = f(\varphi, S)$: 1 – $S = 1,5$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

Економічна ефективність використання коштів на енергоносії в ТНУ зростає в разі збільшення φ і ціни на паливо. Зазначимо, що ціна на електроенергію зростає повільніше, ніж ціна на паливо. Ця обставина має сприяти більш широкому впровадженню ТНУ. Але, у разі низьких цін на палива, граничні значення φ_{zp} , за яких $H > 1$ і $W > 0$, зростають. Із рис. 5 видно, що для $S=1,5$ $\varphi_{zp} > 5$. Зазначимо, що величина W по суті є індикатором економічного складника застосування ТНУ, оскільки характеризує витрати на енергоносії. Вона є необхідним доповненням (12). Так, наприклад, із рис. 5 видно, що економічний складник ефективності застосування ТНУ для $S=2$ настає лише в разі $\varphi > 3,6$, а енергетичний, за (12) – у разі $\varphi = 3$. Зважаючи на вищевикладене, привертаємо увагу до того, що підвищення енергетичної ефективності ТНУ не завжди може бути гарантією підвищення її економічної ефективності.

Одним із засобів підвищення енергетичної ефективності роботи ТНУ є застосування газових двигунів для привода компресора [7]. Порівняємо тепер ефективність тепlopостачання від водогрійної котельні та ТНУ з приводом компресора від газової турбіни. Для певної газотурбінної (ГТУ) завжди відомі її паспортні дані: корисна потужність – N_c , коефіцієнт корисної дії – η_c , температура відпрацьованих у ГТУ газів – t_{6z} . Через високі значення t_{6z} ГТУ оснащують котлом-утилізатором, у якому за рахунок охолодження відпрацьованих газів до температури t_{kv} підігрівається зворотна мережна вода системи тепlopостачання.

Порівнювати ефективність тепlopостачання від котельні та ТНУ з газотурбінним приводом компресора можна або за умови сталої теплової потужності Q_k , або за умови, що корисна потужність ГТУ дорівнює необхідній потужності привода компресора ТНУ. Порівняння за першим варіантом пов'язано з труднощами підбору ГТУ, оскільки невідомо співвідношення між тепловими потужностями конденсатора ТНУ і котла-утилізатора. Зважаючи на це, вибираємо ГТУ, корисна потужність якої дорівнюватиме потужності

привода компресора, тобто $N_z = N$.

Витрата умовного палива на ГТУ, кг/с

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

Потужність відпрацьованих у ГТУ газів

$$Q_{\text{вз}} = (1 - \eta_z) N_z / \eta_z. \quad (18)$$

Коефіцієнт утилізації теплоти відпрацьованих у ГТУ газів у котлі-утилізаторі [7]

$$\psi = \frac{t_{\text{вз}} - t_{\text{кв}}}{t_{\text{вз}} - t_{\text{нс}}}, \quad (19)$$

де $t_{\text{нс}}$ – температура навколишнього середовища, яка за міжнародними правилами дорівнює 15°C .

Теплова потужність котла-утилізатора

$$Q_{\text{кв}} = Q_{\text{вз}} \cdot \psi = (1 - \eta_z) \cdot N_z \cdot \psi / \eta_z = \gamma \cdot N_z. \quad (20)$$

Теплова потужність конденсатора ТНУ з певним значенням опалювального коефіцієнта

$$Q_{\text{к}} = \varphi \cdot N_z. \quad (21)$$

Сумарна теплова потужність ТНУ з газотурбінним приводом компресора

$$Q_c = Q_{\text{кв}} + Q_{\text{к}} = N_z \cdot (\gamma + \varphi). \quad (22)$$

Подібно до (8), формула для економії або перевитрати умовного палива матиме вигляд

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

Зрозуміло, що економія умовного палива на ТНУ досягається за умови $\eta_{\text{к}} < \eta_z \cdot \varphi$. Вона зростає в разі зменшення $\eta_{\text{к}}$ та збільшення η_z і φ . Характер залежностей $\Delta B_z = f \cdot [(\eta_z \cdot \varphi), \eta_{\text{кот}}]$ подібний до залежностей, наведених на рис. 3.

Питома витрата умовного палива на виробництво теплоти, кг/МДж

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

Питому витрату умовного палива в котельні визначають за (10). Тоді відносна величина питомої витрати умовного палива дорівнюватиме, %

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

Тут, як і у (12), додатні значення b_{*z} характеризують перевитрату умовного палива в котельні. Для зручності визначення b_{*z} побудовано номограму, яку показано на рис. 6.

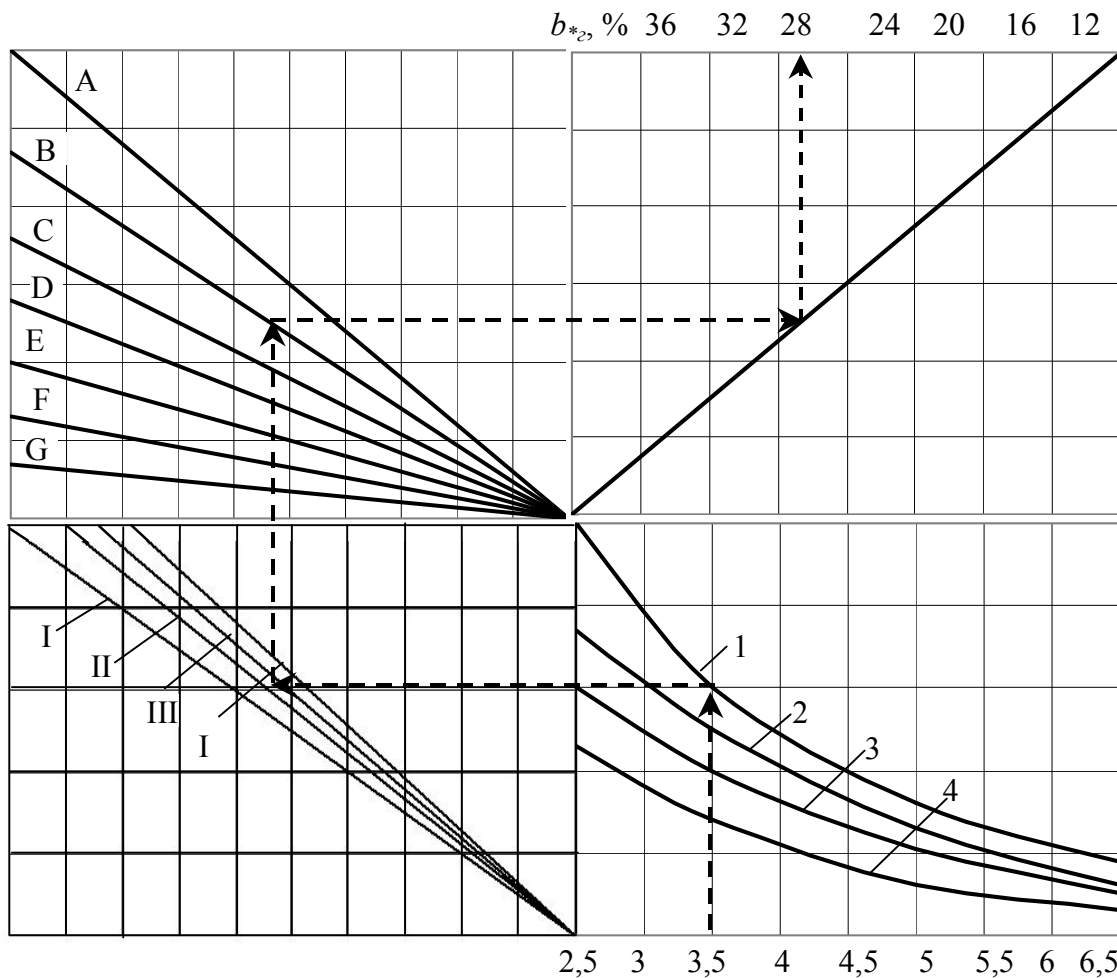


Рис. 6. Номограма для визначення відносної питомої витрати умовного палива на ТНУ з газотурбінним приводом компресора: 1 – $\gamma = 1,0$; 2 – 1,4; 3 – 2; 4 – 2,6; I – $\eta_{ком} = 0,94$; II – 0,9; III – 0,85; IV – 0,8; A – $\eta_z = 0,3$; B – 0,32; C – 0,34; D – 0,36; F – 0,4; G – 0,42

Із номограми видно, що найбільший вплив на величину b_{*2} здійснюють опалювальний коефіцієнт ТНУ і ККД газотурбінної установки. Зі збільшенням цих величин підвищується ефективність застосування ТНУ з газотурбінним приводом компресора. Порівнюючи (12) і (25), бачимо, що для однакових значень $\eta_{ком}$ і ϕ і за умови $\eta_{ec} \approx \eta_z$ енергетична ефективність ТНУ з газотурбінним приводом компресора вища за ефективність роботи ТНУ з електроприводом компресора, оскільки $\eta_{ем} < 1$, а $\gamma \geq 1$. У цьому неважко переконатися. Нехай задано: $\eta_{ком} < 0,9$; $\phi = 3,2$; $\eta_{ec} = 0,34$; $\eta_{ем} = 0,9$; $\eta_z = 0,32 < \eta_{ec}$; $\gamma = 1$. Тоді розрахунки b_* за (12) і b_{*2} за (25) дають: $b_* = 8,09\%$, $b_{*2} = 33\%$.

У разі роботи ТНУ з газотурбінним приводом компресора і в ГТУ, і в котельні спалюється умовне паливо з однаковою ціною. Беручи до уваги (13), (14), (16) і (17), одержимо вираз для визначення годинної відносної вартості умовного палива, %

$$W_z = \left(\frac{Z_{ком}}{Z_{ТНУ}} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{\eta_z \phi}{\eta_{ком}} - 1 \right) \cdot 100. \quad (26)$$

Порівнюючи (25) і (26), можна побачити, що і в цьому випадку показник енергетичної ефективності перевищує значення індикатора економічного використання енергоносіїв. Перевитрата на паливо в котельні тим більша, ніж менше $\eta_{ком}$ і більше значення η_z і ϕ , що підтверджує (23). Якщо, наприклад, $\eta_z = 0,34$, а $\eta_{ком} = 0,9$, то граничне значення опалювального коефіцієнта, за якого спостерігають зменшення витрат на паливо, дорівнює

$$\varphi_{cp} = 2,8.$$

Зауважимо, що рішення про доцільність упровадження ТНУ в кожному конкретному випадку необхідно приймати на підставі детальних техніко-економічних розрахунків, оскільки відомо, що питома вартість ТНУ, а тим більше ГТУ, значно перевищує питому вартість котельного устаткування. Крім того, одинична потужність ТНУ обмежена й не перевищує 5 – 6 МВт.

Висновки

1. Проаналізовано особливості роботи теплонасосних установок з електро- і газотурбінним приводом компресора.
2. Отримано зручні формули та побудовано номограми для визначення показників ефективності роботи ТНУ порівняно з роботою опалювальних котелень.
3. Визначено умови та межі зміни основних характеристик ТНУ, а також впливу співвідношення цін на енергоносії, за яких досягається підвищення ефективності ТНУ та економії палива на 20% і більше.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Теорія холодильних машин и тепловых насосов / Т. В. Морозюк. – Одеса: 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 котелень 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.

Чепурний Марко Миколайович – к. т. н., доцент, професор кафедри теплоенергетики.

Ткаченко Станіслав Йосипович – д. т. н., професор, завідувач кафедри теплоенергетики.

Резидент Наталія Володимирівна – к. т. н., старший викладач кафедри теплоенергетики.
Вінницький національний технічний університет.