

УДК 631.536

М. М. Чепурний, к. т. н., доц.; О. В. Куцак; І. М. Димніч
ГАЗОТУРБІННІ НАДБУДОВИ НА ПРОМИСЛОВИХ
ТЕПЛОЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛЯХ З ПРОТИТИСКОВИМИ ПАРОВИМИ
ТУРБІНАМИ

Визначено співвідношення між основними показниками роботи комбінованих установок на базі промислових теплоелектроцентралей з газотурбінними надбудовами.

Ключові слова: парова турбіна, газова турбіна, протитискова турбіна, теплоелектроцентрально.

Вступ

Спільне виробництво теплової та електричної енергії є прогресивною технологією, яка дозволяє більш ефективно використовувати органічне паливо й зменшити шкідливі викиди в атмосферу. Незважаючи на значний прогрес у розвитку теплоелектроцентралей (ТЕЦ) в Україні, централізоване тепlopостачання великої кількості споживачів здійснюється не від ТЕЦ, а від котелень. Ефективна робота ТЕЦ залежить від наявності сталих теплових навантажень. Проте зараз склалась ситуація, коли внаслідок зменшення споживання технологічної пари на промислових ТЕЦ неможливо виробляти проектні електричні потужності. Варто зважати також на дефіцит електроенергії після повної зупинки Чорнобильської атомної станції.

До складу великої кількості підприємств переробного профілю входять промислові ТЕЦ, оснащені протитисковими паровими турбінами невеликої потужності (1,5 – 6 МВт). Такі паротурбінні установки (ПТУ) не мають конденсаторів і характеризуються високою енергетичною ефективністю й тепловою продуктивністю. У ПТУ зазначеного типу частина виробництва електроенергії на тепловому постачанні (відношення електричної потужності до теплової від 0,08 до 0,2) мала і змінюється. На сьогодні багато протитискових ПТУ на ТЕЦ працюють недовантаженими, або вони зупинені. Тоді як ПТУ з протитисковими турбінами можуть постачати пару не тільки промисловим, але й теплофікаційним споживачам. Що ж до збільшення виробництва електроенергії на ТЕЦ, то ця проблема вирішується шляхом надбудови на існуючих паротурбінних теплоелектроцентралях газотурбінних установок (ГТУ) [1 – 3]. Газотурбінні надбудови на існуючих промислових ТЕЦ дозволяють значно підвищити виробництво додаткової електроенергії та заощадити паливо в енергосистемі. Ефективність застосування ГТУ на конденсаційних електростанціях, тобто для більш простих схем комбінованих установок, визначено в [4].

Зважаючи на вищевикладене, метою цієї роботи є визначення показників роботи промислових ТЕЦ з протитисковими турбінами в разі надбудови їх на газотурбінних установках.

Основні результати

Принципову теплову схему комбінованої установки на базі протитискової парової турбіни й ГТУ показано на рис. 1, де також нанесено позначення: витрат пари (D_0), тиску (P), температур (t), ентальпій (h).

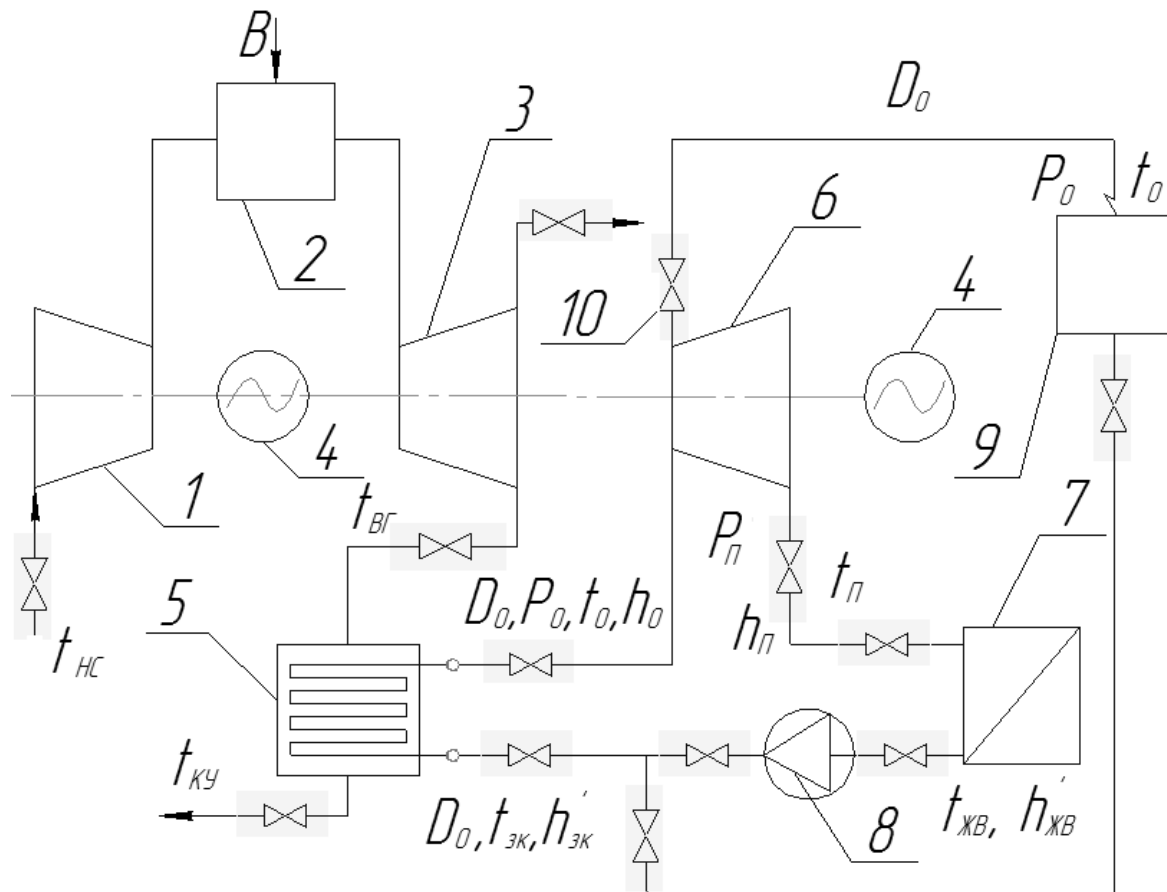


Рис. 1. Принципова схема газопарової ТЕЦ: 1 – компресор ГТУ; 2 – камера згорання ГТУ; 3 – газова турбіна; 4 – електрогенератор; 5 – котел-утилізатор; 6 – парова протитискова турбіна; 7 – споживач пари; 8 – насос зворотного конденсату; 9 – паровий котел; 10 – запірні арматура

Компресор (1) стискає повітря з навколишнього середовища й нагнітає його в камеру згорання (2), де згорає робоче паливо (рідке або газоподібне) з витратою B . Продукти згорання надходять у газову турбіну (3), де виконують роботу обертання вала. Ця робота в електрогенераторі (4) перетворюється на електроенергію. Відпрацьовані в газовій турбіні продукти згорання з температурою $t_{вг}$ спрямовуються в котел-утилізатор (5), де, охолоджуючись до температури $t_{ку}$, генерують перегріту водяну пару з параметрами P_0, t_0 і витратою D_0 . Водяна пара виконує роботу в протитисковій турбіні (6) і з кінцевими параметрами $P_{п}, t_{п}, h_{п}$ надходить до теплових споживачів (7). Зворотний конденсат з параметрами $t_{зк}, h'_{зк}$ насосом зворотного конденсату (8) повертається в котел-утилізатор (КУ). Така комбінована установка може працювати як спільно, так і окремо. У разі окремої схеми замість КУ працює паровий котел (9). Розглянемо основні показники роботи установки.

Витрата умовного палива на ГТУ [4]

$$B_r = N_r / (\eta_r \cdot Q_y), \quad (1)$$

де N_r – електрична потужність ГТУ; η_r – ККД ГТУ; Q_y – теплота згорання умовного палива, яка дорівнює 29,3 МДж/кг.

Теплова потужність котла-утилізатора [4]

$$Q_{ку} = N_r \cdot \psi (1 - \eta_r) / \eta_r = N_r \cdot \phi, \quad (2)$$

де $\psi = (t_{вг} - t_{ку}) / (t_{вг} - t_{нс})$ – коефіцієнт утилізації теплоти відпрацьованих у ГТУ газів; $t_{нс}$ – температура повітря навколишнього середовища, яка відповідно до міжнародних правил дорівнює 15°C.

Для спрощення розрахунків значення коефіцієнта ϕ наведено на рис. 2.

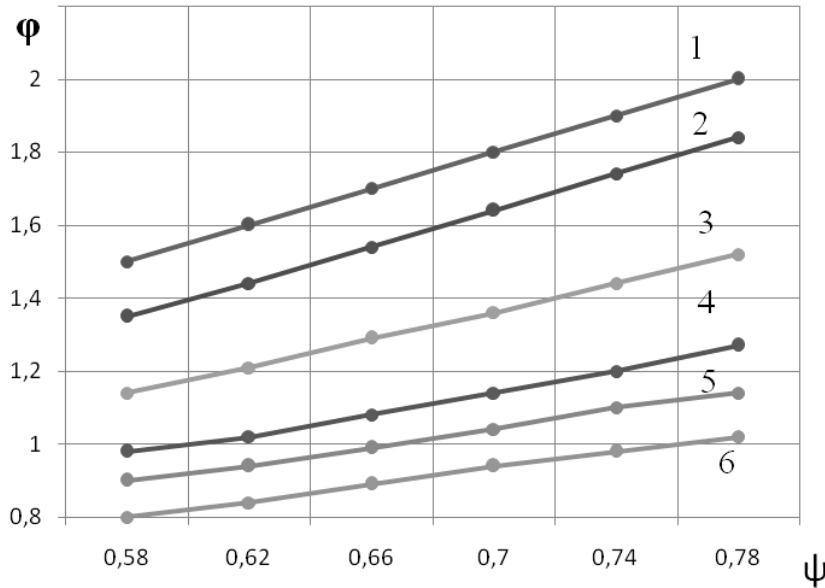


Рис. 2 . Значення φ у формулі (2): 1 – η_r = 0,28; 2 – 0,3; 3 – 0,34; 4 – 0,38; 5 – 0,42; 6 – 0,46

Зрозуміло, що в разі сумісної роботи ГТУ і ПТУ потужність котла-утилізатора має дорівнювати потужності ПТУ, тобто

$$Q_{ky} = Q_{сп} + N_{п} = N_{п} (1 + e) / e = N_{п} \epsilon, \quad (3)$$

де $N_{п}$ – електрична потужність ПТУ; $Q_{сп}$ – теплова потужність споживачів пари;
 $e = N_{п} / Q_{сп}$ – коефіцієнт виробництва електроенергії на тепловому постачанні.

Порівнявши (2) і (3), одержимо

$$N^* = N_{г} / N_{п} = \epsilon / \varphi. \quad (4)$$

Остання формула дозволяє визначати електричну потужність газотурбінної надбудови ПТУ з протитисковою турбіною. Для оперативного визначення величини N^* побудований графік, зображено на рис. 3.

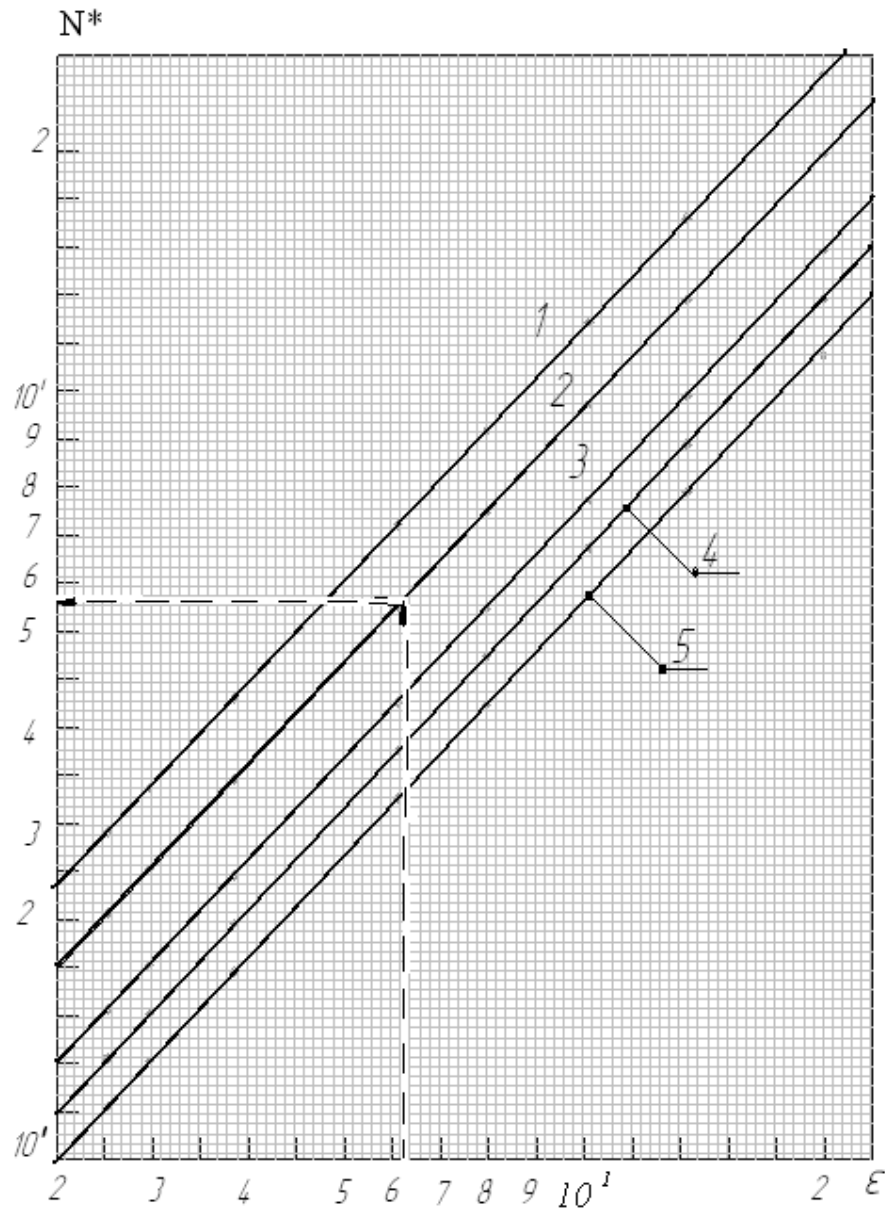


Рис. 3. Значення відносної електричної потужності за формулою (4): 1 – $\varphi = 0,9$; 2 – 1,2; 3 – 1,5; 4 – 1,8; 5 – 2,1

У разі окремої роботи ПТУ витрата умовного палива в паровому котлі дорівнює

$$B_{\text{п}} = (N_{\text{п}} + Q_{\text{сп}}) / (Q_{\text{y}} \cdot \eta_{\text{к}}) = N_{\text{п}} \varepsilon / (Q_{\text{y}} \cdot \eta_{\text{к}}), \quad (5)$$

де $\eta_{\text{к}}$ – ККД парового котла.

Враховуючи (1) і (5), отримаємо

$$B_{\text{Г}} - B_{\text{п}} = N_{\text{п}} / Q_{\text{y}} (\varepsilon / \varphi - 1 / \eta_{\text{к}}), \quad (6)$$

$$B^* = B_{\text{Г}} / B_{\text{п}} = \eta_{\text{к}} / (\eta_{\text{Г}} \cdot \varphi). \quad (7)$$

Формула (7) показує в скільки разів витрата умовного палива в ГТУ має бути більша за втрати умовного палива в ПТУ. Для зручності на рис. 4 побудовано номограму для визначення відносної витрати палива B^* .

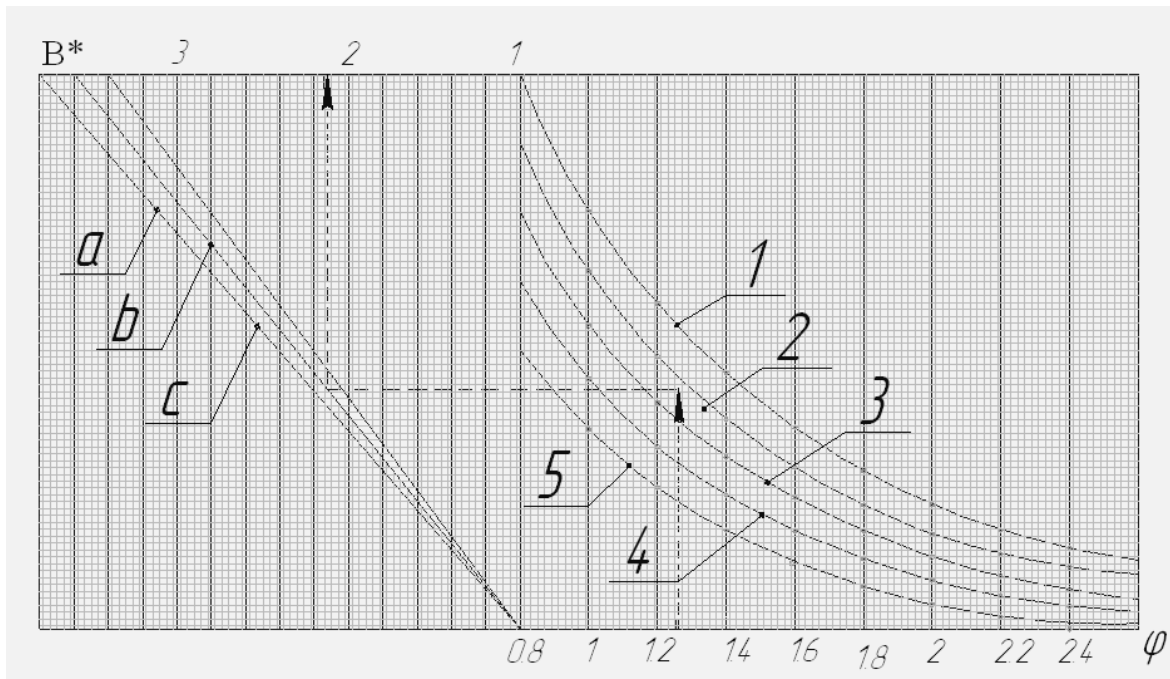


Рис. 4. Номограма для визначення B^* у формулі (7): 1 – $\eta_r = 0,3$; 2 – $0,34$; 3 – $0,38$; 4 – $0,4$; 5 – $0,44$; a – $\eta_k = 0,94$; b – $0,9$; c – $0,86$

Сумарна потужність, вироблена на ГТУ – ТЕЦ

$$Q_c = N_r + N_{п} + Q_{сп} = N_{п} \epsilon (1 + \phi) / \phi = N_{п} \epsilon \alpha. \quad (8)$$

Енергетична ефективність ГТУ – ТЕЦ однозначно оцінюється за допомогою питомої витрати умовного палива [5], величина якої в нашому випадку складає, кг/ГДж

$$b = B_r / Q_c = 10^3 / [\eta_r \cdot Q_y (1 + \phi)]. \quad (9)$$

Для експрес-оцінки енергетичної ефективності роботи газотурбінних надбудов на промислових ТЕЦ з протитисковими турбінами можна скористатись залежностями, наведеними на рис. 5.

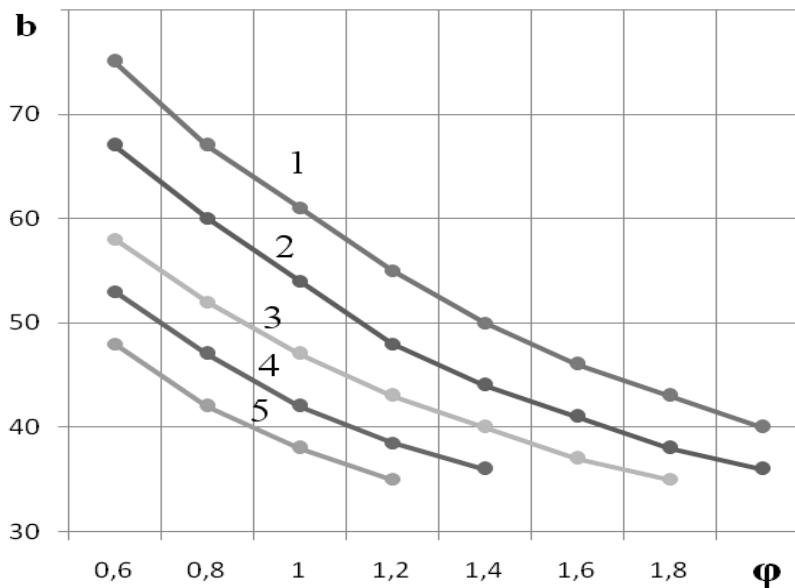


Рис. 5. Значення питомої витрати умовного палива на сумісне виробництво теплової та електричної енергії: 1 – $\eta_r = 0,28$; 2 – $0,32$; 3 – $0,36$; 4 – $0,4$; 5 – $0,44$

Отже, отримано зручні для інженерних розрахунків формули, а також побудовано графіки й номограму для визначення характеристик і показників роботи комбінованих енергетичних

установок у складі ГТУ і ПТУ з протитисковими турбінами. Ці результати є необхідною передумовою для впровадження газотурбінних надбудов на промислових ТЕЦ. Проілюструємо це на прикладі. Нехай треба підібрати ГТУ для надбудови ПТУ з протитисловою паровою турбіною Р-4-35/3, яка має такі характеристики [6]: електрична потужність 4 МВт; тиск і температура пари перед турбіною 3,5 МПа і 435°C відповідно; тиск пари за турбіною 0,3 МПа; витрата пари на турбіну 35,6 т/год; температура живильної води 105°C; потужність споживачів пари 23,9 МВт.

Коефіцієнт виробництва електроенергії на тепловому постачанні й величина ε в (3).

$$\varepsilon = N_{\text{п}} / Q_{\text{сп}} = 4/23,9 = 0,1673; \quad \varepsilon = (1 + 0,1673)/0,1673 = 6,975.$$

Підбираємо ГТУ вітчизняного виробництва із номенклатури підприємства НВП «Машпроект» м. Миколаєва. При цьому беремо ГТУ з найбільшим ККД ($\eta_{\text{г}} = 0,36$) і з температурою газів за турбіною $t_{\text{вг}} = 490^{\circ}\text{C}$. Для забезпечення необхідного температурного напору в КУ температуру за КУ беремо 160°C.

Коефіцієнт утилізації теплоти в КУ

$$\Psi = (t_{\text{вг}} - t_{\text{ку}}) / (t_{\text{вг}} - t_{\text{нс}}) = (490 - 160) / (490 - 15) = 0,694.$$

Із рис. 2 визначаємо коефіцієнт φ в (2): $\varphi = 1,23$.

Із рис. 3 визначаємо значення N^* , яке дорівнює 5,8.

Необхідна потужність ГТУ, МВт

$$N_{\text{г}} = N^* \cdot N_{\text{п}} = 5,8 \cdot 4 = 23,2.$$

Остаточню вибираємо тип ГТУ виробництва НВП «Машпроект», а саме – турбіну ГТ-25 з $\eta_{\text{г}} = 0,36$ і $t_{\text{вг}} = 490^{\circ}\text{C}$.

Витрата умовного палива на ПТУ за (5), кг/с

$$B_{\text{п}} = (4 + 23,9) / (29,3 \cdot 0,9) = 1,05.$$

Із рис. 4 визначаємо величину B^* у формулі (7): $B^* = 2,15$.

Необхідна витрата умовного палива на надбудовану ГТУ, кг/с

$$B_{\text{г}} = B^* \cdot B_{\text{п}} = 1,05 \cdot 2,15 = 2,25.$$

Перевіряємо витрату умовного палива на ГТУ за (1), кг/с

$$B_{\text{г}} = N_{\text{г}} / (\eta_{\text{г}} \cdot Q_{\text{в}}) = 23,2 / (0,36 \cdot 29,3) = 2,2.$$

Із рис. 5 визначаємо питому витрату умовного палива на комбіновану установку:

$$b = 42,5 \text{ кг/ГДж}.$$

Перевіряємо цю величину за формулою (9), кг/ГДж

$$b = 10^3 / [0,36 \cdot 29,3(1 + 1,23)] = 42,51.$$

Отже, використання наведеного графічного матеріалу забезпечує необхідну точність розрахунків. Зазначимо також, що величина питомої витрати умовного палива в комбінованій установці вдвічі менша, ніж у ГТУ.

Висновки

1. Газотурбінні надбудови на промислових ТЕЦ доцільно застосовувати для збільшення виробництва електроенергії в регіоні.
2. На промислових ТЕЦ з протитисковими турбінами за рахунок газотурбінних надбудов виробництво електроенергії може бути збільшено в 5 – 6 разів.
3. Ефективність роботи ГТУ – ТЕЦ з протитисковими паровими турбінами вдвічі більша за ефективність роботи ГТУ.
4. Отримані формули і графічний матеріал дозволяють з достатньою точністю визначити основні показники роботи ТЕЦ із газотурбінними надбудовами і є необхідною передумовою для вибору ГТУ й оцінки енергетичної ефективності комбінованих установок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Левин Л. И. О выборе схем теплоснабжения городов при использовании парогазовых технологий / Наукові праці ВНТУ, 2011, № 1

Л. И. Левин // Промышленная энергетика. – 2006. – № 2. – С. 57 – 58.

2. Ревзин Б. С. О роли теплофикации и о развитии ГТУ и ПТУ в новых условиях / Б. С. Ревзин, О. В. Комаров,

А. А. Стяжкин // Газотурбинные технологии. – 2007. – № 5. – С. 12 – 13.

3. Жарков С. В. О перспективах оборудования отопительных ТЭЦ в России / С. В. Жарков // Газотурбинные технологии. – 2007. – № 2. – С. 12 – 13.

4. Чепурной М. Н. Эффективность применения ГТУ-ТЭС / М. Н. Чепурной, С. Й. Ткаченко, Е. С. Корженко // Энергосбережение. – 2006. – № 10. – С. 24 – 26.

5. Чепурний М. М. Ефективність роботи паротурбінних і газотурбінних теплоелектроцентралей / М. М. Чепурний // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 2. – С. 36 – 40.

6. Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. – М.: Энергия. – 1978. – Т. 1. – 743 с.

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

Куцак Ольга Володимирівна – студентка інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Димніч Глона Миколаївна – студентка інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання. Вінницький національний технічний університет.