

УДК 621.438

М. М. Чепурний, канд. техн. наук, доц.;

С. Й. Ткаченко, д-р техн. наук, проф.;

О. В. Антропова, студ.

ГАЗОПАРОВІ УСТАНОВКИ НА БАЗІ ГАЗОТУРБІННИХ І ТЕПЛОФІКАЦІЙНИХ ПАРОВИХ ТУРБІН

Запропоновано методику обчислення основних показників роботи газопарових установок на базі теплоелектроцентралей з теплофікаційними турбінами. Побудовані номограми для визначення цих показників.

Стан проблеми

За нових економічних умов, коли зростають ціни на паливо, електричну та теплову енергію, енергозбереження стає одним із головних факторів виходу країни із скрутного становища. Виробництво електроенергії в Україні за технічним рівнем відстає від розвинутих країн. Понад 90 % устаткування теплових електричних станцій вичерпало нормативний ресурс роботи, а більше половини з них перевищило визначену світовою практикою межу фізичного та морального зносу. Зазначене зумовило збільшення витрат палива на виробництво електроенергії, що, в свою чергу, збільшило забруднення довкілля шкідливими викидами, які містять продукти згорання палива. Крім цього виникла проблема дефіциту регульовальних потужностей в енергосистемі. За умови передбаченого використання електроенергії для підігріву води в системах теплофікації, дефіцит електроенергії може поглибитись. Вирішення накопичених проблем можливо лише шляхом застосування нових ефективних комбінованих технологій в енергетиці, зокрема парогазових [1—5].

На теперішній час перспективність впровадження комбінованих газопарових установок (ГПУ) є вже загально визнаною. Такі установки дозволяють підвищити ефективність використання палива, яка є однією із основних складових загальної проблеми енергозбереження. Газотурбінні надбудови на існуючих теплоелектроцентралях (ТЕЦ) дозволяють виробляти додаткову електроенергію та економити паливо в енергосистемі. Ефективність застосування ГПУ на базі газотурбінних установок (ГТУ) та парових конденсаційних і протитискових турбін, тобто для простіших схем ГПУ, визначено в [4, 5].

Зважаючи на вищевикладене, метою цієї роботи є визначення показників роботи ГПУ в разі газотурбінних надбудов парових теплофікаційних турбін, які поширені на муніципальних ТЕЦ невеликої потужності.

Основні результати

Принципова схема ГПУ з газовою турбіною, котлом-утилізатором і теплофікаційною паровою турбіною показана на рис. 1, де також позначені тиски (P), температури (T) та ентальпії (h) в характерних точках газового і парового циклів. Тут штрихами позначені ентальпії конденсату, а індексом «1» помічені параметри навколишнього повітря за стандартними умовами ISO 2314: $P_1 = 103$ кПа; $T_1 = 288$ К. Витрата палива в ГТУ позначена B .

Парова турбіна має теплофікаційний відбір пари з параметрами

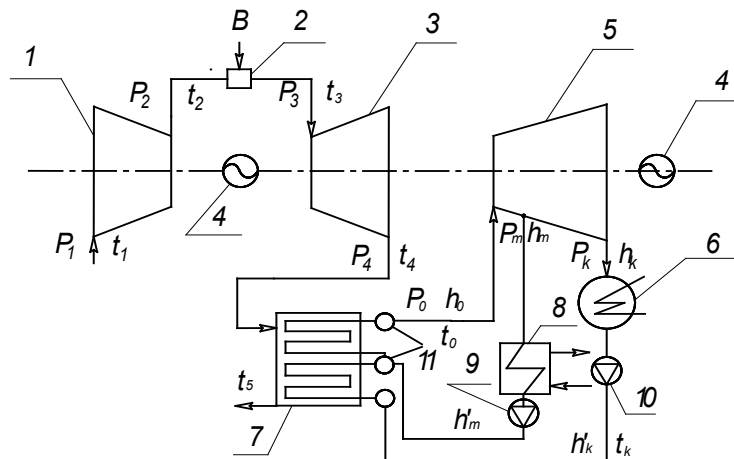


Рис. 1. Принципова схема ГПУ з теплофікаційною паровою турбіною:

- 1 — компресор; 2 — камера згорання; 3 — газова турбіна;
- 4 — електрогенератор; 5 — парова турбіна; 6 — конденсатор;
- 7 — котел-утилізатор; 8 — підігрівник системи теплофікації;
- 9 — дренажний насос; 10 — конденсатний насос; 11 — колектор

P_m, h_m , яка спрямовується в підігрівник мережної води системи теплофікації 8 потужністю $Q_{тф}$. Зворотний конденсат грійної пари перекачується дренажним насосом 9 в другий ступінь економайзера котла-утилізатора. Основний конденсат із конденсатора 6 насосом 10 перекачується насосом в перший ступінь котла-утилізатора 7, який обігрівується відпрацьованими в газовій турбіні газами з температурою T_4 . Температура газів на виході з котла-утилізатора — T_5 , яка з метою зменшення габаритів котла-утилізатора має бути на $70...90\text{ }^\circ\text{C}$ більше температури конденсату, що надходить із конденсатора [4]. Від існуючої теплової схеми паротурбінної установки (ПТУ) газопарова установка відрізняється відсутністю парового котла, який генерує пару для парової турбіни, а також вентилятора і димососа, що зменшує витрати електроенергії на власні потреби ПТУ. Натомість додаються ГТУ і котел-утилізатор (КУ), який виконує функцію парового котла. В КУ генерується водяна пара з параметрами P_0, T_0, h_0 за рахунок утилізації відпрацьованих в ГТУ продуктів згорання палива (димових газів). Отже, за рахунок енергії палива, яке спалюється в камері згорання 2, генерація електроенергії здійснюється як в ГТУ, так і в ПТУ.

Витрата палива в ГТУ, як відомо, визначається з формули [5]

$$B_{\Gamma} = \frac{0,123N_{\Gamma}}{(3,6\eta_{\Gamma})} = \frac{0,03416N_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}}, \quad (1)$$

де N_{Γ} — електрична потужність ГТУ, МВт; η_{Γ} — коефіцієнт корисної дії (ККД) ГТУ.

Потужність котла-утилізатора [5]

$$Q_{ку} = \frac{\psi(1-\eta_{\Gamma})N_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}} = \phi N_{\Gamma}, \quad (2)$$

де $\psi = \frac{(t_4 - t_5)}{(t_4 - t_1)}$ — коефіцієнт утилізації теплоти відпрацьованих в ГТУ димових газів;

$$\phi = \frac{\psi(1-\eta_{\Gamma})}{\eta_{\Gamma}}.$$

Для спрощення розрахунків, значення ϕ можна визначити із залежностей, наведених на рис. 2.

Зрозуміло, що потужність котла-утилізатора має дорівнювати потужності паротурбінної установки $Q_{п}$, тобто $Q_{ку} = Q_{п}$. Баланс потужностей ПТУ:

$$Q_{ку} = Q_{п} = N_{п} + Q_{тф} + Q_{к},$$

де $N_{п}$ — електрична потужність ПТУ; $Q_{тф}$ — потужність, яка віддана в систему теплофікації; $Q_{к}$ — потужність, яка втрачена в конденсаторі парової турбіни.

З урахуванням (2) рівнянню (3) можна надати вигляд:

$$\phi N_{\Gamma} (1 - \alpha_{к}) = \frac{N_{п} (1 + \varepsilon)}{\varepsilon}, \quad (4)$$

де $\alpha_{к} = \frac{Q_{к}}{Q_{п}}$ — частка втрат в конденсаторі; $\varepsilon = \frac{N_{п}}{Q_{тф}}$ — частка виробництва електроенергії на

тепловому постачанні.

З останнього рівняння легко визначається співвідношення між потужностями ПТУ і ГТУ

$$N^* = \frac{N_{п}}{N_{\Gamma}} = \frac{\phi \varepsilon (1 - \alpha_{к})}{(1 + \varepsilon)}. \quad (5)$$

Для визначення N^* побудована номограма, яка показана на рис. 3.

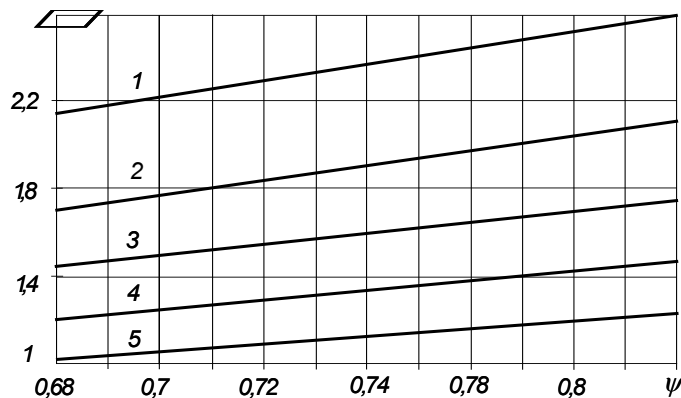


Рис. 2. Значення коефіцієнта ϕ :
1 — $\eta_{\Gamma} = 0,24$; 2 — $0,28$; 3 — $0,32$; 4 — $0,36$; 5 — $0,4$.

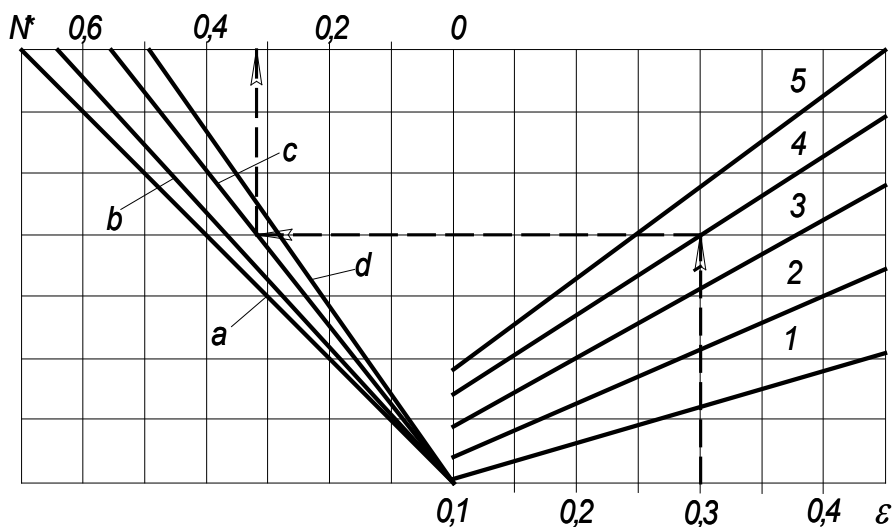


Рис. 3. Номограма для визначення N^* :
 1 — $\phi = 1$; 2 — 1,4; 3 — 1,8; 4 — 2,2; 5 — 2,6; $a - \alpha_k = 0,1$; $b - 0,2$; $c - 0,3$; $d - 0,4$

На підставі (2)—(5) корисна потужність, яка віддана електричним і тепловим споживачам комбінованою газопаровою установкою складатиме:

$$Q_{\text{ГПУ}} = N_{\text{Г}} + N_{\text{П}} + Q_{\text{ТФ}} = N_{\text{Г}} [1 + \phi(1 - \alpha_k)] \tag{6}$$

Тоді з урахуванням (1) питома витрата умовного палива на одиницю виробленої енергії дорівнюватиме, кг/МДж

$$b = \frac{B}{Q_{\text{ГПУ}}} = \frac{0,03416}{\eta_{\text{Г}} [1 + \phi(1 - \alpha_k)]} \tag{7}$$

На рис. 4 наведена номограма для визначення питомих витрат умовного палива b для ГПУ.

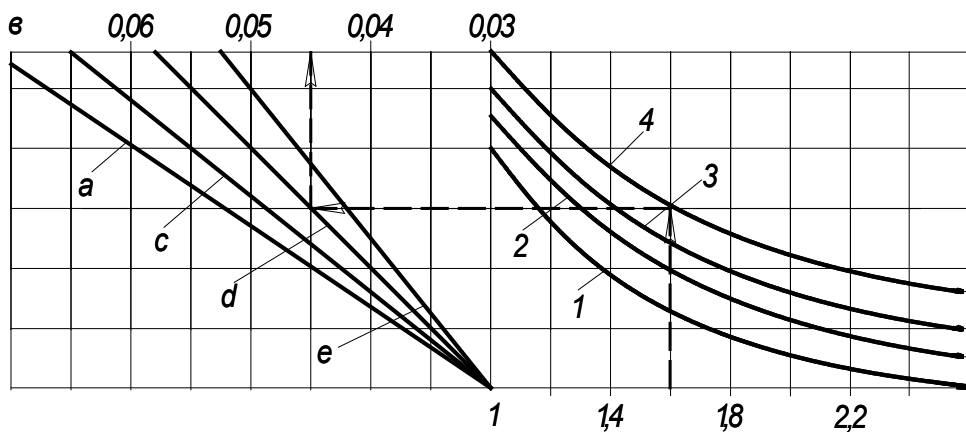


Рис. 4. Номограма для визначення b :
 1 — $\alpha_k = 0,1$; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,4; $a - \eta_{\text{Г}} = 0,28$; $c - 0,32$; $d - 0,36$; $e - 0,4$

Отже, отримані зручні формули для визначення основних показників роботи ГПУ з теплофікаційними турбінами, які базуються на основних характеристиках газотурбінних і паротурбінних установок. Побудовані номограми дозволяють здійснювати експрес-аналіз роботи ГПУ зазначеного типу. Вибір ГТУ для існуючої теплофікаційної ПТУ повинен здійснюватись за умови $Q_{\text{п}} = Q_{\text{ку}}$.

В табл. 1 за [6] наведені характеристики теплофікаційних турбін, які експлуатуються на ТЕЦ невеликих потужностей, а також розрахункові показники їх роботи. Розрахунки здійснювались за умови: ККД парового котла — $\eta_{\text{пк}} = 0,91$; тиск в теплофікаційному відборі — $P_{\text{Г}} = 0,122$ МПа; тиск в конденсаторі турбіни — $P_{\text{к}} = 5$ кПа; початкові параметри перед турбіною — $P_0 = 3,5$ МПа, $t_0 = 435$ °С.

Таблиця 1

Характеристики і показники роботи ПТУ

Показники	Тип ПТУ/номер варіанта		
	T-4-35	T-6-35	T-12-35
	1	2	3
Електрична потужність, МВт	4	6	12
Витрата пари на турбіну, т/год	28,4	42,3	81,5
Витрата пари на теплофікацію, т/год	22	35	65
Теплофікаційна потужність, МВт	13,817	21,977	40,811
Частка виробництва енергії на тепловому постачанні (ϵ)	0,289	0,273	0,294
Потужність, яка втрачається в конденсаторі, МВт	3,893	4,447	10,05
Загальна потужність ПТУ, МВт	21,71	32,424	62,861
Частка потужності, яка втрачається в конденсаторі (α_c)	0,179	0,137	0,16
Корисна потужність ПТУ, МВт	17,817	27,977	52,811
Витрата умовного палива, кг/с	0,8142	1,217	2,357
Питома витрата умовного палива на виробництво енергії, кг/МДж	0,0457	0,0436	0,0446

Таблиця 2

Тип, характеристики ГТУ і показники роботи ГПУ за варіантами в таблиці 1

Показники	Номер варіанта		
	1	2	3
Тип газотурбінної установки	ГТ-20	ГТД-25	ГТД-50
Електрична потужність ГТУ, МВт	20	25	50
Коефіцієнт корисної дії ГТУ	0,36	0,36	0,34
Температура газів за турбіною, °С	520	490	490
Значення коефіцієнта ϕ	1,408	1,384	1,512
Необхідна електрична потужність ГТУ, МВт	15,5	23,45	41,576
Витрата умовного палива на ГТУ, кг/с	1,47	2,22	4,177
Загальна корисна потужність ГПУ, МВт	33,317	51,427	94,326
Питома витрата умовного палива на виробництво енергії в ГПУ, кг/МДж	0,044	0,043	0,0409
Питома витрата умовного палива на виробництво додаткової електроенергії в ГПУ b_e , кг/(кВт·год)	0,152	0,1535	0,1575

Тип ГТУ для надбудови вибраних типів ПТУ здійснювався за умови, що температура відпрацьованих в ГТУ газів має бути не менше 490 °С. Це забезпечує генерацію перегрітої пари з температурою 435 °С без додаткового спалювання палива в котлі-утилізаторі. В табл. 2 наведені типи вибраних ГТУ, які серійно виготовляються енергомашинобудівними підприємствами країни, а також їх основні характеристики. Крім того, тут зведені розрахункові показники роботи ГПУ, створеними на базі типових ПТУ і ГТУ. Оскільки показники роботи ПТУ в складі ГПУ залишаються незмінними, то збільшення витрати палива на ГТУ в порівнянні з витратою палива на ПТУ, можна віднести на виробництво додаткової електричної потужності в ГТУ. Тоді питома витрата умовного палива на виробництво додаткової енергії дорівнюватиме, кг/(кВт·год)

$$b_e = \frac{(B_r - B_{\text{пту}}) 3,6}{N_r} \quad (8)$$

Значення b_e також наведені в табл. 2. Дані табл. 2 свідчать про доцільність створення газотурбінних надбудов на ТЕЦ з теплофікаційними турбінами, оскільки додаткове виробництво енергії в ГПУ здійснюється з покращенням використання палива (зменшенням питомої витрати умовного палива на виробництво енергії). Зазначимо також, що питома витрата умовного палива на виробництво додаткової електроенергії в ГПУ в середньому в 2,2 рази менша, ніж в енергосистемі. Для теплофікаційних турбін з електричною потужністю більше 12 МВт температура перегрітої пари перед турбіною перевищує 500 °С. Для генерації пари з такими температурами в котлі-утилізаторі необхідно додатково спалювати паливо, що призводить як до здорожчання устаткування, так і до зменшення ефективності використання палива в газопаровій установці.

Висновки

1. Отримані формули і побудовані номограми дають змогу вибирати тип ГТУ для газотурбінних надбудов на ТЕЦ з теплофікаційними турбінами невеликих потужностей, а також визначити показники роботи комбінованих газопарових установок.
2. Дослідження ефективності роботи таких ГПУ свідчить про доцільність їх застосування.
3. Застосування газопарових установок з теплофікаційними паровими турбінами потужністю більше 12 МВт пов'язано з необхідністю додаткового спалювання палива в котлі-утилізаторі та зменшенням ефективності використання палива і тому не може вважатись доцільним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рейсиг В. А. Энергетические характеристики парогазовых установок с котлами-утилизаторами / В. А. Рейсиг, М. М. Чепурной // Пром. теплотехника. — 2003. — Т. 25. — № 1. — С. 61—64.
2. Беркнев В. С. Возможный способ повышения мощности и экономичности стационарных комбинированных установок с газовыми турбинами / В. С. Беркнев, В. Л. Иванов, В. А. Фомин. // Теплоэнергетика. — 2005. — № 6. — С. 43—47.
3. Иванов В. Л. О возможности надстройки энергоблоков газотурбинными установками / В. Л. Иванов, А. В. Клевцов, А. В. Корягин // Энергосбережение и водоподготовка. — 2005. — № 3. — С. 43—45.
4. Чепурной М. М. Эффективность применения ГТУ-ТЭС / М. М. Чепурной, С. Й. Ткаченко, Е. С. Корженко. // Энергосбережение. — 2006. — № 10. — С. 24—26.
5. Чепурний М. М. Газотурбінні надбудови на ТЕЦ з протитисковими турбінами / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко // Вісник Хмельницького національного університету. — 2007. — № 3. — С. 88—91.
6. Теплотехнический справочник; под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. — М.: Энергия. — 1985. — Т. 1. — 743 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 28.05.09
Рекомендована до друку 15.06.09

Чепурний Марко Миколайович — професор, **Ткаченко Станіслав Йосипович** — завідувач кафедри.

Кафедра теплоенергетики;

Антропова Олена Володимирівна — студентка Інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет