

УДК 621. 438. 311

М. М. Чепурний, к. т. н., доц.;

С. Й. Ткаченко, д. т. н., проф.

## ТЕПЛОЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛІ НА БАЗІ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК І ПАРОВИХ ТУРБІН З НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИМ РОБОЧИМ ТІЛОМ

*Визначено показники роботи комбінованих бінарних установок, утворених на базі газотурбінних двигунів з прибудованими турбінами, які працюють на низькотемпературному робочому тілі.*

### Стан проблеми

Загальновідомим є той факт, що понад 90 % теплоенергетичного устаткування, встановленого на теплових електростанціях України, давно вичерпало нормативний ресурс роботи, а 60 % його — майже подвійний. Для реанімації вітчизняної теплоенергетики потрібні значні капіталовкладення (не менше мільярда доларів США на тисячу мегават електрогенерувальних потужностей), яких в Україні на теперішній час просто немає. Однак подальший підйом економіки України неможливий без нарощування електричних потужностей. Нарощування електричних потужностей за рахунок введення в дію нових енергоблоків на атомних станціях, крім значних капіталовкладень, тільки посилить проблему нестачі маневрених потужностей в енергосистемі, дефіцит яких дорівнює 1500 МВт. Зауважимо також, що в зв'язку з подорожчанням природного газу, багато споживачів теплоти (опалення і гаряче водопостачання) будуть переорієнтовано на електронагрів води, а це може викликати дефіцит електроенергії в системі.

Одним з пріоритетних напрямків розвитку вітчизняної енергетики вважається модернізація наявного теплоенергетичного устаткування. Саме в теплоенергетиці існують реальні можливості використання нових ефективних технологій за кошти вітчизняних, а не іноземних інвесторів. Актуальними стають питання застосування газотурбінних установок (ГТУ) з утилізацією теплоти відпрацьованих газів, а також застосування бінарних циклів, які працюють на низькотемпературних робочих тілах (НРТ). На жаль, в літературі висвітлено лише окремі загальні принципи застосування бінарних циклів, працюючих з НРТ в другому циклі [1—3]. В попередній роботі [4] авторами розглянуто застосування бінарних циклів на ТЕЦ з протитисковими турбінами та конденсаційними прибудованими турбінами, які працюють на НРТ.

*Мета роботи* — визначення показників роботи бінарних установок, створених на базі утилізаційних ГТУ і теплофікаційних прибудованих турбін, які працюють на низькотемпературному робочому тілі в другому циклі.

### Основні результати

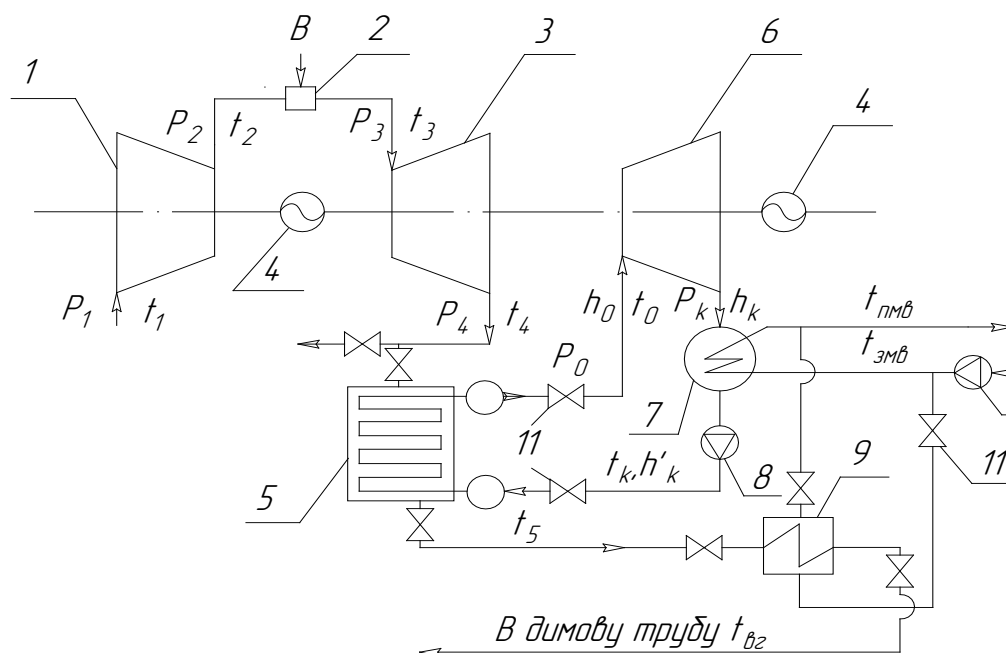
За базові ГТУ вибрані такі, які серійно виготовляються на вітчизняних енергомашинобудівних підприємствах, зокрема на фірмі «Зоря» (м. Миколаїв). Основні характеристики вибраних ГТУ подані в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики ГТУ

Показники	Тип ГТУ / № варіанта			
	ГТД-2,5	ГТД-6	ГТД-16	ГТД-25
	1	2	3	4
Електрична потужність, МВт	2,85	6,7	17	27,5
Міра підвищення тиску в компресорі	12	16,6	17,8	21,8
Температура перед турбіною, °С	950	1000	1000	1250
Температура за турбіною, °С	443	420	420	490
Коефіцієнт корисної дії	0,285	0,315	0,35	0,36
Витрата умовного палива, кг/с	0,3416	0,7265	1,659	2,609

Схема бінарної установки на базі ГТУ і турбіни, яка працює на НРТ, показана на рисунку, де також позначені параметри в характерних точках ( $P$  — тиск;  $t$  — температура;  $h$  — ентальпія).



Принципова схема бінарної установки: 1 — компресор ГТУ; 2 — камера згорання; 3 — газова турбіна; 4 — електрогенератор; 5 — котел-утилізатор; 6 — турбіна з НРТ; 7 — конденсатор; 8 — конденсатний насос; 9 — газоводяний теплообмінник; 10 — мережний насос; 11 — запірна арматура

Відпрацьовані в газовій турбіні 3 продукти згорання палива (димові гази) з температурою  $t_4$  надходять в котел-утилізатор (КУ), де генерують пару НРТ з параметрами  $P_0, t_0, h_0$ , яка надходить в парову турбіну 6. Низькотемпературним робочим тілом, як і в [4], вибраний бензол ( $C_6H_6$ ), для якого розроблені та серійно випускаються турбіни фірми «ORMAT» [5]. Початкові параметри пари бензолу перед турбіною складають:  $P_0 = 0,6$  МПа;  $t_0 = 327$  °С;  $h_0 = 656$  кДж/кг.

Відпрацьована в турбіні 6 пара бензолу має параметри:  $P_k = 0,217$  МПа;  $t_k = 108$  °С;  $h_k = 365$  кДж/кг. Конденсатор турбіни охолоджується зворотною мережною водою системи теплофікації з температурою 50 °С.

В конденсаторі 7 ця вода підігрівається до 104 °С і надходить до теплофікаційних споживачів. Конденсат пари бензолу з ентальпією  $h'_k = -103,2$  кДж/кг конденсаційним насосом 8 повертається в котел-утилізатор 5. Для зменшення габаритів КУ різниця температур між грійними димовими газами і конденсатом бензолу має перевищувати 50 °С [4]. У зв'язку з цим температура газів на виході з КУ має бути не меншою  $t_5 = 170$  °С. Але в цьому випадку зменшується як теплова потужність КУ, так і ефективність використання теплоти палива в комбінованій бінарній установці. Тому запропоновано в тепловій схемі бінарного циклу встановити додатковий газоводяний теплообмінник 9, в якому димові гази, охолоджуючись до температури  $t_{вг} = 130$  °С, мають підігрівати частину мережної води від 50 до 104 °С. Ця частина води змішується з основною частиною, яка підігрівається до такої ж температури в конденсаторі 7 бензолової турбіни. Математична модель для визначення основних показників роботи комбінованої теплофікаційної бінарної установки наводиться нижче.

Витрата умовного палива в ГТУ за [6], кг/с

$$B = 0,123N_r / (3,6\eta_r) = 0,034166N_r / \eta_r, \tag{1}$$

де  $N_r$  — електрична потужність ГТУ, МВт;  $\eta_r$  — коефіцієнт корисної дії (ККД) ГТУ.

Теплова потужність відпрацьованих в ГТУ газів, МВт

$$Q_{вг} = (1 - \eta_r)N_r / \eta_r. \tag{2}$$

Витрата димових газів в ГТУ, кг/с

$$G_{\Gamma} = Q_{\text{вг}} \cdot 10^3 / [C_{\text{рг}} (t_4 - t_5)], \quad (3)$$

де  $C_{\text{рг}}$  — середня масова ізобарна теплоємність димових газів для зазначеного інтервалу температур, кДж/(кг·К).

Теплова потужність котла-утилізатора, МВт

$$Q_{\text{ку}} = \psi (1 - \eta_{\Gamma}) N_{\Gamma} / \eta_{\Gamma} = \phi \cdot N_{\Gamma}, \quad (4)$$

де  $\psi = (t_4 - t_5) / (t_4 - t_1)$  — коефіцієнт використання теплоти газів в КУ;  $\phi = \psi (1 - \eta_{\Gamma}) / \eta_{\Gamma}$ ;  $t_1$  — температура навколишнього повітря, яка за міжнародними правилами ISO дорівнює 15 °С.

Теплова потужність газоводяного теплообмінника, МВт

$$Q_{\text{то}} = G_{\Gamma} C_{\text{рг}} (t_5 - t_{\text{вг}}) \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$

Масова витрата бензолу в другому циклі, кг/с

$$G_{\text{б}} = Q_{\text{ку}} \cdot 10^3 / (h_{\text{о}} - h'_{\text{к}}). \quad (6)$$

Електрична потужність бензолової турбоустановки, МВт

$$N_{\text{б}} = G_{\text{б}} (h_{\text{о}} - h_{\text{к}}) \cdot 10^{-3} \cdot \eta_{\text{ем}}, \quad (7)$$

де  $\eta_{\text{ем}}$  — електромеханічний ККД.

Теплова потужність конденсатора, МВт

$$Q_{\text{к}} = G_{\text{б}} (h_{\text{к}} - h'_{\text{к}}) \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Загальна електрична потужність ТЕЦ, МВт

$$N_{\text{тец}} = N_{\Gamma} + N_{\text{б}}. \quad (9)$$

Загальна теплофікаційна потужність ТЕЦ, МВт

$$Q_{\text{тец}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{то}}. \quad (10)$$

Частка виробництва електроенергії на тепловому постачанні

$$\varepsilon = N_{\text{тец}} / Q_{\text{тец}}. \quad (11)$$

Питома витрата умовного палива на одиницю виробленої енергії

$$B = B / (N_{\text{тец}} + Q_{\text{тец}}). \quad (12)$$

Витрата мережної води в системі теплофікації, кг/с

$$G_{\text{мв}} = Q_{\text{тец}} \cdot 10^3 / [C_{\text{рв}} (t_{\text{пмв}} - t_{\text{змв}})], \quad (13)$$

де  $t_{\text{пмв}}$  і  $t_{\text{змв}}$  — температура прямої та зворотної мережної води, відповідно;  $C_{\text{рв}}$  — теплоємність води для середньої температури.

Потужність електропривода мережного насоса, МВт

$$N_{\text{мн}} = G_{\text{мв}} H_{\text{мн}} / (\rho_{\text{в}} \eta_{\text{н}} \eta_{\text{ем}}), \quad (14)$$

де  $H_{\text{мн}}$  — напір мережного насоса в МПа;  $\rho_{\text{в}}$  — густина води для температури зворотної мережної води;  $\eta_{\text{н}}$  — ККД насоса.

Потужність конденсатного насоса, МВт

$$N_{\text{кн}} = G_{\text{б}} H_{\text{кн}} / (\rho_{\text{б}} \eta_{\text{н}} \eta_{\text{ем}}), \quad (15)$$

де  $H_{\text{кн}}$  — напір конденсатного насоса в МПа;  $\rho_{\text{б}}$  — густина бензолу для температури  $t_{\text{к}}$  за [7].

Електрична потужність власних потреб ТЕЦ, МВт

$$N_{\text{вп}} = \kappa_3 (N_{\text{мн}} + N_{\text{кн}}), \quad (16)$$

де  $\kappa_3 = 1,05 \dots 1,08$  — коефіцієнт запасу.

Електрична потужність, що віддана в електромережу, МВт

$$N_{ем} = N_{тец} - N_{вп} \quad (17)$$

Частка електричної потужності, яка витрачається на власні потреби ТЕЦ

$$e = N_{вп} / N_{тец} \quad (18)$$

Розрахунки за зазначеними в табл. 1 варіантами здійснювались за умов:  $H_{мн} = 1$  МПа;  $N_{кн} = 0,5$  МПа;  $\eta_{н} = 0,78$ ;  $\eta_{ем} = 0,96$ . Результати розрахунків зведені в табл. 2.

Таблиця 2

Показники роботи ГТУ-ТЕЦ бінарного циклу

Показники	Варіанти			
	1	2	3	4
Потужність котла утилізатора, МВт	4,561	8,978	19,482	32,935
Витрата НРТ в другому циклі, кг/с	6,01	11,828	25,66	50,141
Електрична потужність бензоліної турбіни, МВт	1,676	3,302	7,168	14,02
Загальна електрична потужність ТЕЦ, МВт	4,526	10,02	24,168	41,52
Потужність конденсатора, МВт	2,448	4,825	10,469	20,457
Потужність газоводяного підігрівника, МВт	0,659	1,45	3,123	5,11
Загальна теплофікаційна потужність ТЕЦ, МВт	3,107	6,275	13,592	25,567
Виробництво електроенергії на тепловому постачанні ( $\epsilon$ )	1,456	1,596	1,778	1,624
Електрична потужність власних потреб, МВт	0,44	0,868	1,874	3,636
Загальна (електрична і тепла) потужність власних потреб ТЕЦ, МВт	6,202	16,275	37,76	65,5
Питома витрата умовного палива на виробництво енергії, кг/МДж	0,055	0,0448	0,0446	0,04
Витрата умовного палива для роздільної схеми енергопостачання, кг/с	0,6068	1,318	3,126	5,417
Річна економія умовного палива на ГТУ-ТЕЦ бінарного циклу, т/рік	6817	15344	38024	72795
Річна економія кисню, т/рік	7051	15881	39354	75343
Річне зменшення викидів, т/рік:				
окису вуглецю	0,834	1,879	4,654	8,904
двоокису вуглецю	1458	3282	8129	15551
оксидів азоту	1,651	3,714	9,204	17,62

Тут також наведені результати зіставлення відпуску енергоносіїв від ГТУ-ТЕЦ бінарного циклу з відпуском енергоносіїв за роздільною схемою енергопостачання (електроенергії з електромережі, а теплоти від котельні). При цьому вважалось: ККД водогрійних котлів — 0,915; середнє значення ККД електростанцій — 0,35; ККД електромереж — 0,91. Крім того, за ГДК 34.02.305 — 2002 «Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок» обчислено річне зменшення шкідливих викидів в атмосферу в разі застосування ГТУ-ТЕЦ бінарного циклу.

Наведені результати свідчать про те, що застосування прибудованих турбін, які працюють на низькотемпературних робочих тілах, на ГТУ-ТЕЦ з глибшою утилізацією відпрацьованих в ГТУ газів забезпечують 50 % збільшення електричної потужності без додаткової витрати палива. Крім того, відпуск теплоти від запропонованих комбінованих установок складає 46...69 % від їх загальної електричної потужності. Оскільки значення коефіцієнта  $\epsilon$ , який характеризує виробництво електроенергії на тепловому постачанні, більше за одиницю, то запропонована тепла схема ГТУ-ТЕЦ доцільно насамперед для нарощування електричних потужностей в регіоні. В разі потреби високих теплових навантажень доцільна цілорічна робота установок з відпуском теплоти тільки на гаряче водопостачання. Із табл. 2 впливає також, що ефективніше працюють комбіновані установки з більшою електричною потужністю ГТУ. Зауважимо, що, в порівнянні з роздільною схемою енергопостачання, спостерігається не тільки 50 % економія палива, а присутні також й витрати електроенергії на власні потреби за рахунок вилучення з роботи тягодуттєвих установок на електростанціях і котельнях. Економія умовного палива на ГТУ-ТЕЦ бінарного циклу дозволяє майже вдвічі зменшити шкідливі викиди в атмосферу.

### Висновки

1. ГТУ-ТЕЦ бінарного циклу з глибшим охолодженням відпрацьованих в ГТУ газів дозволяють на 50...60 % збільшити виробництво електроенергії без додаткової витрати палива.
2. Теплофікаційна потужність зазначених ТЕЦ складає 50 % від їх електричної потужності.
3. ГТУ-ТЕЦ з прибудованими турбінами, які працюють на низькотемпературних робочих тілах, дозволяють майже вдвічі зменшити шкідливі викиди в атмосферу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Билека Б. Утилизация сбросной теплоты ГПА в установках с низкикипящими рабочими телами / Б. Билека, Е. Васильев, В. Кабанов // Газотурбинные технологии, 2002. — № 5. — С. 6—10.
2. A power generation system by low-temperature heat recovery // CADDET energy efficiency. Caddet Centre. September 2002, — 42 p.
3. Сапожников М. Б. Электрические станции на низкотемпературных рабочих телах / М. Б. Сапожников, М. И. Тимошенко // Теплоэнергетика, 2005. — № 3. — С.73—77.
4. Чепурний М. М. Застосування бінарних циклів на ТЕЦ / М. М. Чепурний, О. В. Антропова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2008. — № 3. — С. 37—41. — ISSN 1997-9266.
5. ORMAT ENERGI CONVERTER. Technical bulletin, ORMAT INK, 1990. — 11 p.
6. Чепурний М. М. Показники роботи газопарових установок бінарного типу / М. М. Чепурний, В. В. Бужинський, В. А. Рейсиг // Проблеми загальної енергетики. — 2004. — № 11. — С. 65—68.
7. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. — М. : Наука, 1982. — 720 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 26.05.09  
Рекомендована до друку 3.07.09

**Чепурний Марко Миколайович** — професор, **Ткаченко Станіслав Йосипович** — завідувач кафедри.  
Кафедра теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет