

УДК 621.438

**М.М. ЧЕПУРНИЙ**, канд. техн. наук, **В.В. БУЖИНСЬКИЙ**, канд. техн. наук (Вінницький національний технічний університет), **В.А. РЕЙСІГ**, докт. техн. наук (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ).

## ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ГАЗОПАРОВИХ УСТАНОВОК БІНАРНОГО ТИПУ

Визначено особливості роботи та енергетичні показники газопарових установок бінарного типу.

Виробництво електроенергії в Україні за технічним рівнем відстає від розвинених країн. Понад 90% устаткування теплових електричних станцій вичерпало нормативний ресурс роботи, а більше половини з них значно перевищило визначену світовою практикою межу фізичного та морального зносу. Означене зумовило збільшення витрат палива на одиницю виробленої електроенергії, що, своєю чергою, збільшило забруднення довкілля шкідливими викидами, які містяться у продуктах згоряння палива. Крім того, виникла проблема дефіциту регулюючих потужностей в енергосистемі, резерв яких за оцінками Мінпаливоенерго має становити понад 1000 МВт. Вирішити накопичені проблеми можливо лише шляхом застосування нових високоефективних технологій, зокрема, газопарових [1, 2].

В газопарових установках (ГПУ) бінарного типу виробництво електроенергії здійснюється в газотурбінних (ГТУ) і паротурбінних (ПТУ) установках. При цьому водяна пара для ПТУ генерується в котлах-утилізаторах (КУ) за рахунок теплоти відпрацьованих у ГТУ продуктів згоряння палива (димових газів). Котли-утилізатори можуть працювати як з додатковим спалюванням палива, так і без нього.

Принципову теплову схему такої ГПУ наведено на рис. 1, де: 1 – компресор; 2 – камера згоряння; 3 – газова турбіна; 4 – електрогенератор; 5 – котел-утилізатор; 6 – камера допалювання; 7 – парова турбіна; 8 – конденсатор; 9 – насос.

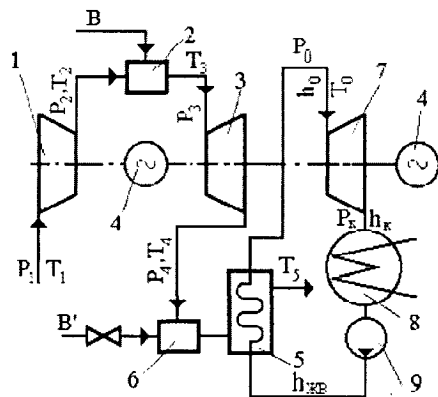


Рис. 1

На рис. 1 наведено також позначення основних параметрів робочих тіл газового і парового контурів. У ГПУ без додаткового спалювання палива (без допалювання) ГТУ працює з великими значеннями коефіцієнтів зайвину повітря. В таких ГПУ відносна витрата пари (витрату пари віднесено до витрати повітря) незначна і становить, як правило, до 0,18 кг/кг. Температура пари, яка генерується в КУ, менша за температуру відпрацьованих у ГТУ газів на величину недогрівання, яка становить 60-80°C. Підвищити початкові параметри пари, отже і коефіцієнт корисної дії (ККД) парового циклу та продуктивність КУ, можна за рахунок додаткового спалювання палива в камері допалювання. В літературі немає однозначних висновків щодо впливу ККД ПТУ і додаткового спалювання палива на ефективність роботи ГПУ.

З огляду на означене вище було поставлено завдання проаналізувати ефективність роботи ГПУ з котлами-утилізаторами. Об'єктами впровадження таких ГПУ насамперед можуть бути газоперекачувальні станції, де потужність постійно працюючих газотурбінних приводів становить від 40 до 100 МВт, а утилізація теплоти відпрацьованих газів майже відсутня. Передбачалось, що в ГПУ з додатковим спалюванням палива допалювання здійснюється в середовищі відпрацьованих газів, вміст кисню в яких залежно від типу ГТУ становить 13-15%. Можлива кількість палива для допалювання обчислювалась за кисневим балансом з урахуванням необхідного коефіцієнта зайвину повітря в камері допалювання. Робочим паливом вважався природний газ із тепловою згоряння  $Q_H^c = 33,44$  МДж/нм<sup>3</sup>. Теоретичні об'єми повітря і продуктів згоряння становили 9,52 і 10,6 нм<sup>3</sup>/нм<sup>3</sup> відповідно.

Згідно з позначеннями, які наведено на рис. 1, з'ясуємо спочатку характеристики роботи ГПУ без допалювання. Для конкретної ГТУ завжди відомі паспортні дані: електрична (корисна) потужність  $N_{ГТУ}$ ; коефіцієнт корисної дії  $\eta_{ГТУ}$ ; температура

газів перед турбіною  $T_3$  і на виході з турбіни  $T_4$ , температури повітря на вході в компресор  $T_1$ .

За співвідношеннями, отриманими в [3], здійснено варіантні розрахунки показників роботи ГПУ, які показано на рис. 2 (де  $1 - \varphi = 0,38$ ;  $2 - 0,44$ ;  $3 - 0,5$ ;  $4 - 0,56$ ;  $5 - 0,62$ ). Суцільними лініями позначено залежності відносного ККД  $\eta^* = \eta_{\text{ГПУ}}/\eta_{\text{ГТУ}}$  і штриховими — залежності відносної потужності  $N^* = N_{\text{ГПУ}}/N_{\text{ГТУ}}$ ;  $\varphi = (1 - \eta_{\text{ГТУ}}) \eta_{\text{КУ}}$ ;  $\eta_{\text{КУ}}$  — ККД котла утилізатора;  $\eta^* = \eta_{\text{ГТУ}}/\eta_{\text{ГПУ}}$ . Наявність таких залежностей дає змогу не лише раціонально добирати газотурбінне і паротурбінне устаткування для ГПУ, а й прогнозувати показники ефективності роботи останньої. Нехай, наприклад, відомо:  $N_{\text{ГТУ}}=1$  МВт;  $\eta_{\text{ГТУ}}=0,3$ ;  $\eta_{\text{КУ}}=0,8$ ;  $\eta_{\text{ГПУ}}=0,25$ . Тоді  $\varphi = 0,8(1-0,3)=0,56$ ;  $\eta^* = 0,3/0,25 = 1,2$ . З рис. 2 визначаємо:  $\eta^*=1,466$ ;  $N^*=2,14$ , звідки одержуємо:  $\eta_{\text{ГПУ}}=1,466 \cdot 0,3=0,411$ ;  $N_{\text{ГПУ}}=1/2,14=0,467$  МВт;  $N_{\text{ГПУ}} = N_{\text{ГТУ}} + N_{\text{ГПУ}} = 1 + 0,467=1,467$  МВт.

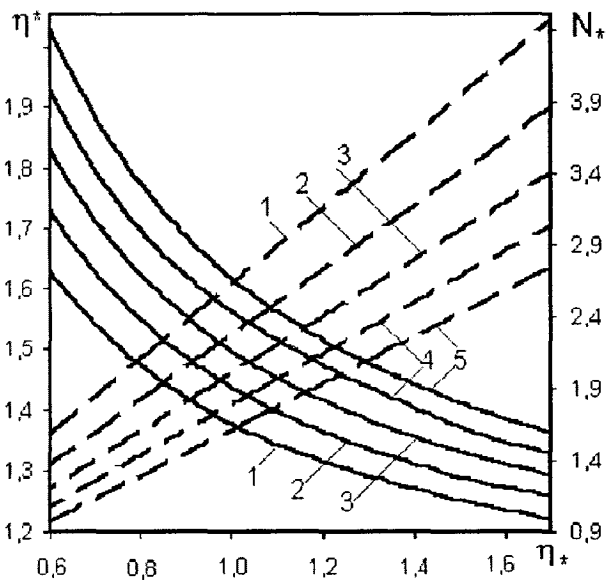


Рис. 2

Розглянемо, як зміняться показники роботи ГПУ, якщо ККД ГТУ збільшиться на 5%, тобто  $\eta_{\text{ГТУ}}=0,35$  за умови, що всі інші ККД залишаться сталими. В цьому випадку  $\varphi = 0,52$ ;  $\eta^*=1,4$ . З рис. 2 визначаємо  $\eta^*=1,371$ ;  $N^*=2,637$ . Тоді  $\eta_{\text{ГПУ}}=0,48$ ;  $N_{\text{ГПУ}}=0,379$  МВт;  $N_{\text{ГПУ}}=1,379$  МВт. Отже приріст ККД ГПУ становить 0,041, а потужність  $N_{\text{ГТУ}}$  і  $N_{\text{ГПУ}}$  зменшується на 0,088 МВт.

Якщо за умовами першого прикладу збільшиться лише ККД ПТУ на 5%, тобто  $\eta_{\text{ПТУ}}=0,3$ , то матимемо  $\varphi=0,56$ ;  $\eta^*=1$ . З рис. 2 визначаємо:  $\eta^*=1,56$ ;  $N^*=1,785$ . Тоді  $\eta_{\text{ГПУ}}=0,468$ ;  $N_{\text{ГПУ}}=0,56$  МВт;

$N_{\text{ГПУ}}=1,56$  МВт. Таким чином, приріст ККД ГПУ становить 0,028, а приріст потужності 0,093 МВт.

З наведених прикладів видно, що на підвищення ефективності роботи ГПУ більш суттєво впливає ККД ГТУ, а на збільшення потужності — ККД ПТУ. Останнє пояснюється тим, що з підвищенням  $\eta_{\text{ГТУ}}$  утилізаційна потужність котла-утилізатора зменшується. Втім, у будь-якому разі ефективність застосування ГПУ очевидна, оскільки приріст ККД ГПУ зростає на 0,14-0,16 порівняно з ККД ГТУ або ПТУ. Це дає змогу на виробництві 1 МВт-год електроенергії заощаджувати близько 95 кг умовного палива, або 83  $\text{м}^3$  природного газу.

Як показано вище, нарощення електричної потужності парового контуру ГПУ пов'язане з підвищенням його ККД, який, як відомо, зростає зі збільшенням початкових параметрів пари, і насамперед температури. В цьому плані використання КУ з додатковим спалюванням палива в середовищі відпрацьованих у ГТУ газів дозволяє збільшити температуру останніх. Внаслідок цього збільшується початкова температура пари і температурні напори в газоходах КУ, зменшуються габарити КУ і його вартість.

За рахунок додаткової витрати палива в камері допалювання температура газів на вході в КУ підвищиться до певного значення. Розрахункові залежності температур  $T_4=f(\eta_{\text{ГТУ}},\beta)$ , де  $\beta=B'/B$  — частка допалювання (рис. 1), наведено в [3].

На рис. 3 (де  $a - \beta=0,1$ ;  $b - 0,2$ ;  $c - 0,4$ ;  $d - 0,6$ ;  $e - 0,8$ ;  $f - 1$ ;  $1 - \eta_{\text{КУ}}=0,74$ ;  $2 - 0,8$ ;  $3 - 0,86$ ;  $4 - 0,92$ ) побудовано номограму для визначення значень  $\varphi'=(1-\eta_{\text{ГТУ}}+\beta) \eta_{\text{КУ}}$ . За допомогою цієї номограми і залежностей, показаних на рис. 4 (де  $1 - \varphi' = 0,4$ ;  $2 - 0,6$ ;  $3 - 0,8$ ;  $4 - 1,2$ ;  $5 - 1,6$ ), легко визначається значення відносної потужності  $N^*=N_{\text{ГПУ}}/N_{\text{ГТУ}}$ . З рис. 4 видно, що зі збільшенням  $\beta$ , отже і  $\varphi'$ , значення відносної потужності  $N^*$  зменшуються, тобто зростають потужності паротурбінного циклу.

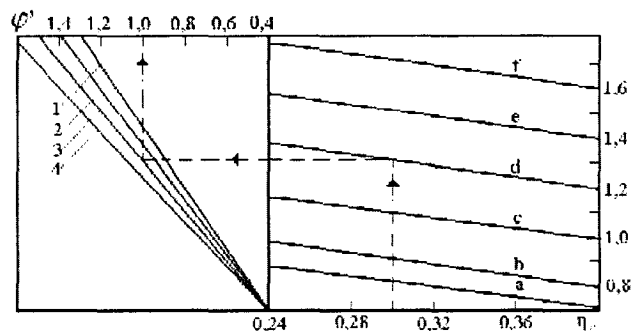


Рис. 3

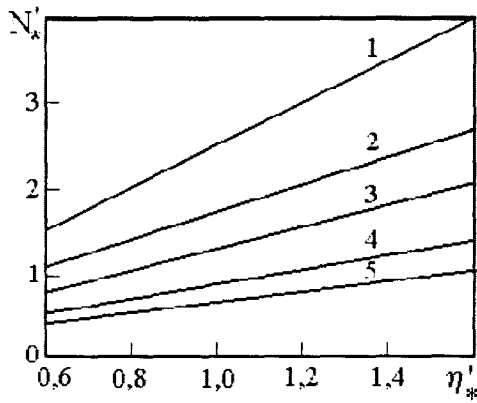


Рис. 4

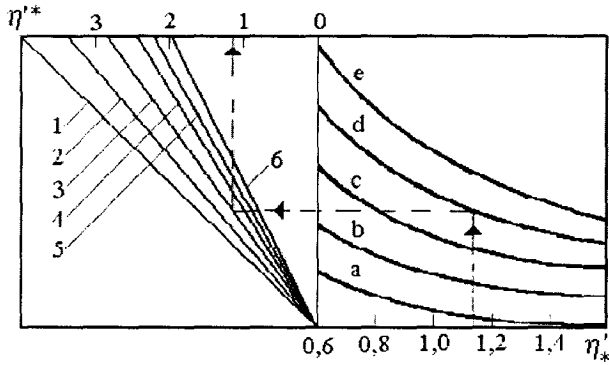


Рис. 5

Для визначення відносних ККД побудовано номограму, яку наведено на рис. 5 (де  $a - \phi' = 0,2$ ;  $b - 0,6$ ;  $c - 1$ ;  $d - 1,4$ ;  $e - 1,8$ ;  $1 - \beta = 0$ ;  $2 - 0,2$ ;  $3 - 0,4$ ;  $4 - 0,6$ ;  $5 - 0,8$ ;  $6 - 1$ ). Наявність номограм дає можливість оперативно оцінювати орієнтовні показники роботи ГТУ з додатковим спалюванням палива. Хоча зі збільшенням  $\beta$  підвищується температура газів у КУ, початкові параметри пари і ККД ПТУ, але дещо зменшується

ККД ПТУ за рахунок додаткової витрати палива. У зв'язку з цим доцільно виявити вплив величини  $\beta$  на показники роботи ПТУ.

Для прикладу в таблиці наведено результати розрахунків показників роботи ПТУ на базі газотурбінної установки ГТН-25-1, яка за умови ISO має характеристики:  $N_r = 27,54$  МВт;  $\eta_r = 0,306$ ;  $t_4 = 464^\circ\text{C}$ . У розрахунках приймалось, що  $\eta_{cm} = 0,965$ ;  $t_5 = 120^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ , а кінцеві значення тиску та міри сухості пари становлять  $0,005$  МПа і  $0,89$  відповідно.

Показники	Значення $\beta$			
	0	0,12	0,19	0,26
ККД котла-утилізатора	0,766	0,794	0,807	0,820
Параметри пари: тиск, Мпа	2,2	3,9	5,5	8,8
температура, $^\circ\text{C}$	375	435	475	500
Потужність ПТУ брутто, МВт	13,6	17,84	20,42	22,14
Потужність ПТУ брутто, МВт	41,14	45,38	47,96	49,68
ККД брутто ПТУ	0,284	0,307	0,318	0,322
ККД брутто ПТУ	0,457	0,451	0,446	0,438

З таблиці видно, що зі збільшенням  $\beta$  зростають початкові параметри пари перед ПТУ, її ККД і потужність, але зменшується ККД ПТУ. Отримані результати відрізняються від [4], але якісно погоджуються з даними [5], де значення  $\beta$  не перевищували  $0,075$ . Зважаючи на це, застосування додаткового спалювання палива може вважатись виправданим у разі дефіциту електроенергії та помірних цін на паливо. Зауважимо також, що питання доцільності допалювання в кожному конкретному випадку має вирішуватись окремо, з урахуванням вартості палива, устаткування і ціни на електроенергію.

1. Плачков І.В., Шидловський А.К., Стогній Б.С. Сучасний стан і перспективи розвитку електроенергетики України // Енергетика і електрифікація. – 1999. – №5. – С. 1-15.

2. Арсеньев Л.В., Полищук В.Г., Соколов Н.П. Газопаровые установки и их показатели // Промышленная теплотехника. – 1999. – Т. 21. – №2-3. – С. 87-95.

3. Рейсиг В.А., Чепурной М.Н., Бужинский В.В. Энергетические характеристики парогазовых установок с котлами-утилизаторами // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25. – №1. – С. 61-64.

4. Клименко В.Н., Сабашук П.П. и др. Влияние экономичности ГТУ на эффективность сжигания топлива в парогазовых установках // Промышленная теплотехника. – 2002. – Т. 24. – №2-3. – С. 91-101.

5. Ермолаев В., Русецкий Ю., Шварцман О. Некоторые аспекты применения ГТУ средней мощности в парогазовых установках утилизационного типа // Газотурбинные технологии. – 2003. – №4. – С. 10-12.