

УДК 621.311

**М. М. Чепурний, к. т. н., доц.; Н. В. Резидент, к. т. н., доц.; Т. М. Олексина;
Ю. К. Возіян**

ТЕПЛОЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛІ З БІНАРНИМ ЦИКЛОМ

Визначено показники роботи бінарних теплоенергетичних установок із низькотемпературним робочим тілом, створених на базі промислових теплоелектроцентралей із протитисковими турбінами.

Ключові слова: бінарний цикл, котел, низькотемпературне робоче тіло, протитискова турбіна, теплоелектроцентрально.

Вступ

Ефективність виробництва енергії – важлива характеристика паливовикористовувальних установок. Її оцінюють за допомогою коефіцієнта використання теплоти палива ($K_{\text{вт}}$), який дорівнює відношенню корисно виробленої потужності до потужності спаленого палива. Комбіноване виробництво теплоти та електроенергії на теплоелектроцентралях (ТЕЦ) є перспективною технологією, яка значною мірою дозволяє розв'язувати питання енергозбереження. Саме тому вона визнана одним з головних напрямків розвитку енергетики України та відображена на законодавчому рівні [1]. Зрозуміло, що нормальна робота ТЕЦ може бути забезпечена за наявності сталих теплових навантажень. Однак тепер склалась така ситуація, коли внаслідок спаду виробництва або його переорієнтації зменшилося споживання технологічної пари і на ТЕЦ промислових підприємств стало неможливо виробляти проектні електричні потужності. Але прогнозоване виробництво електроенергії до 2030 року повинно збільшитись у 1,5 – 2 рази порівняно з 2010 роком [2]. Крім того, не можна не враховувати, що через нестачу енергетичного палива споживання гарячої води багатьох споживачів здійснюватиметься від електрокотелень.

Одним із пріоритетних напрямків модернізації вітчизняної теплоенергетики є застосування нових ефективних технологій. До таких технологій належить використання бінарних циклів, що працюють на низькотемпературних робочих тілах (НРТ). На жаль, у літературі висвітлені лише загальні принципи використання бінарних установок із НРТ [3 – 5].

Зважаючи на вищевикладене, ми зробили спробу визначити основні показники роботи бінарних циклів із НРТ, створених на базі типових парових турбін із невисоким протитиском.

Основні результати

За базові турбіни вибрані типові протитискові турбіни з тиском за турбіною 0,294 МПа, основні характеристики яких наведено в табл. 1. Методика розрахунків теплових схем паротурбінних установок (ПТУ) викладена в [6].

Таблиця 1

Основні характеристики базових протитискових турбін

Показники	Тип турбіни / номер варіанта				
	P-6-35/3	P-4-35/3	P-2,5-35/3	P-2,5-15/3	P-1,5-15/3
	1	2	3	4	5
Температура пари перед турбіною, °С	435	435	435	350	350
Тиск пари перед турбіною, МПа	3,43	3,43	3,43	1,47	1,47
Температура пари за турбіною, °С	186	192	193	193	190
Витрата пари на турбіну, т/год	50,5	35,6	22,3	34,3	20,8
Витрата умовного палива, т/год	5,357	3,784	2,367	3,445	2,088
Теплова потужність споживачів пари, МВт	32,91	23,36	14,63	22,40	13,60
Сумарна корисна потужність, МВт	38,91	27,36	17,13	24,96	15,1
Питома витрата умовного палива, кг/ГДж	38,25	38,4	38,4	38,3	38,4
Електрична потужність власних потреб, МВт	0,463	0,328	0,212	0,178	0,111
Питома теплота, витрачена на перегрів пари із турбіни до 350 °С, кДж/кг	335	323	306	321	327
Коефіцієнт використання теплоти палива	0,892	0,888	0,888	0,89	0,888

Під час визначення показників роботи протитискової паротурбінної установки із вказаним типом турбін вибрано: температура зворотного конденсату 104 °С; температура живильної води 105 °С, коефіцієнт корисної дії (ККД) парових котлів 0,92. Схема бінарної установок на базі типової ПТУ показана на рис.1.

У якості НРТ вибрано бензол (C_6H_6) через наявність фірми, що проектує й виготовляє турбіни, які працюють на парі бензолу [7]. На схемі також наведені позначення параметрів теплоносіїв: P – тиску; t – температури; h – ентальпії пари; h' – ентальпії рідини, а також витрат: D – пари; G – рідини. Вибрані такі початкові параметри пари бензолу на вході в турбіну [8]: $P_6 = 0,6$ МПа; $t_6 = 327$ °С; $h_6 = 656$ кДж / кг. Параметри пари на виході з бензолової турбіни (на вході в конденсатор) дорівнюють: $P_k = 0,0135$ МПа; $t_k = 25$ °С; $h_k = 183$ кДж / кг. Через те, що температура водяної пари на виході з протитискових (базових) турбін нижча за температуру пари на вході в бензолову турбіну, запропонований частковий або повний перегрів цієї пари в паровому котлі. Вторинний перегрів водяної пари дозволяє також дещо зменшити температуру відхідних газів із парового кола, відповідно, підвищити його ККД.

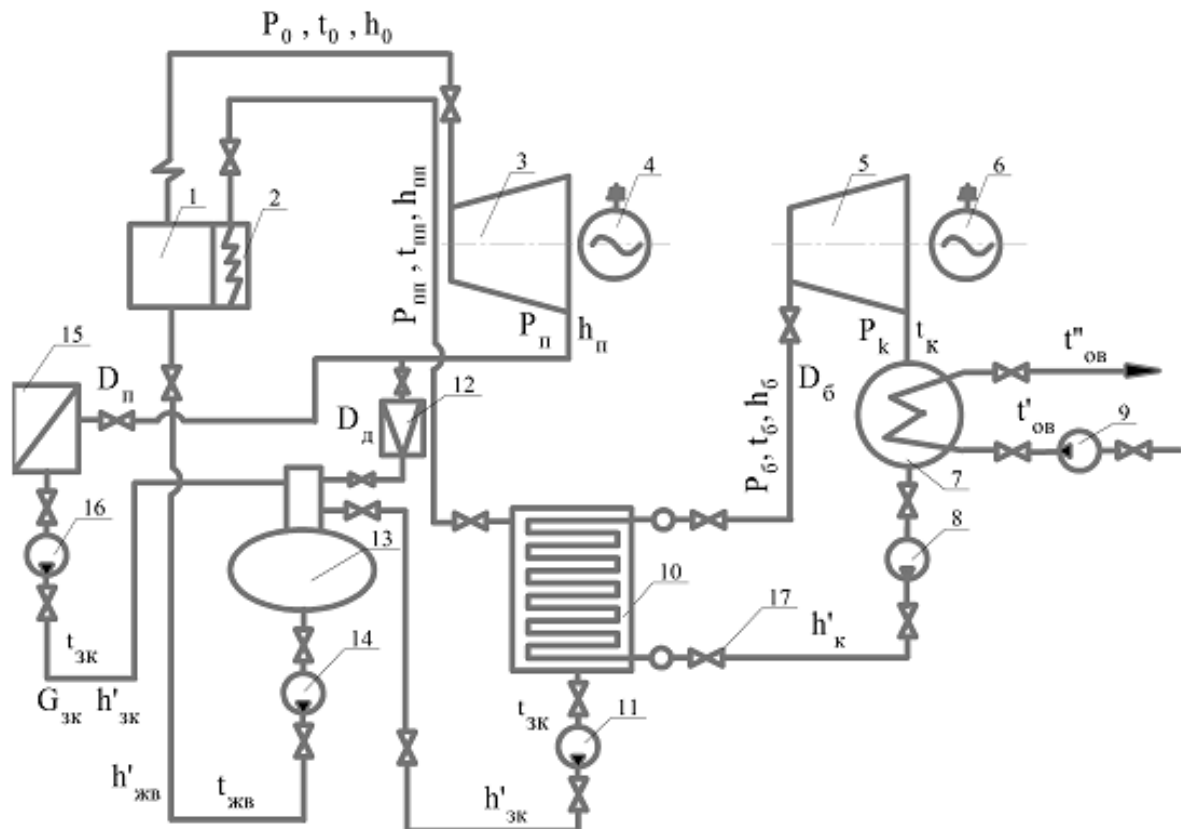


Рис. 1. Принципова тепла схема бінарної установки: 1 – пароводяний котел; 2 – вторинний пароперегрівник; 3 – протитискава парова турбіна; 4 – електрогенератор; 5 – бензолова парова турбіна; 6 – електрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – конденсатний насос; 9 – циркуляційний насос; 10 – котел бензолової пари; 11 – дренажний насос; 12 – паровий редуктор; 13 – атмосферний деаератор; 14 – живильний насос; 15 – споживач водяної пари; 16 – насос зворотного конденсату; 17 – запірна арматура

Унаслідок незначної різниці між температурами живильної води та зворотного конденсату витратою пари в деаератор з достатньою мірою точності можна знехтувати. Якщо позначити витрату водяної пари на турбіну D_o , а частку пари, яка віддається промислового або теплофікаційному споживачу – α , то витрата пари споживачам дорівнюватиме $\alpha \cdot D_o$, а витрата пари на вторинний перегрів і бензоловий котел – $(1 - \alpha) D_o$. Зрозуміло, що за $\alpha = 0$ вся пара із протитиску базової турбіни витрачається на генерацію пари бензолу, а за $\alpha = 1$ низькотемпературний цикл не працює. Методика розрахунків теплових схем бінарних установок описана в [6]. Результати розрахунків показників роботи ТЕЦ з бінарними циклами для варіантів базових турбін наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Основні показники роботи установок за $\alpha = 0$

Показники	Варіанти				
	1	2	3	4	5
Витрата бензолу, кг/с	36,51	25,92	16,23	24,91	15,09
Електрична потужність бензолової ПТУ, МВт	15,5	11,01	6,89	10,59	6,40
Електрична потужність власних потреб бензолової ПТУ, МВт	0,284	0,210	0,131	0,172	0,104
Додаткова витрата умовного палива на перегрів протитискової пари, кг/с	0,16	0,108	0,064	0,104	0,064
Сумарна електрична потужність бінарної установки, МВт	21,50	15,01	9,39	13,09	7,90
Сумарна витрата умовного палива в бінарній установці, кг/с	1,648	1,160	0,722	1,061	0,644
Питома витрата умовного палива: кг/ГДж, кг/(кВт·год)	76,65	77,28	76,89	81,05	81,51
	0,276	0,278	0,277	0,292	0,293
Коефіцієнт використання теплоти палива	0,445	0,442	0,443	0,421	0,418
Річна економія умовного палива на виробництво електроенергії порівняно з її виробництвом в енергосистемі, т/рік	10238	7079	4490	5510	3274
Порівняльне зменшення шкідливих викидів в атмосферу, т/рік: оксику вуглецю, двоокису вуглецю, оксидів азоту	1,621	1,022	0,698	0,921	0,524
	2870	2030	1180	1720	1030
	3,14	2,21	1,42	1,95	1,12

За умови $\alpha=0$ бінарна установка виробляє тільки електроенергію. Із табл. 2 наочно видно, що за допомогою бінарного циклу з НРТ електричні потужності базових ПТУ можуть бути збільшені більш, ніж у 3,5 рази. При цьому витрати палива, пов'язані зі вторинним перегрівом пари, із протитиску збільшуються всього на 10 – 11%. Слід відзначити збільшення електричної потужності власних потреб. Не можна не звернути уваги на те, що для нульової потужності теплових споживачів загальна ефективність роботи бінарної установки зменшується. Тим не менше, якби додаткова електрична потужність вироблялась на електростанціях об'єднаної енергосистеми з ККД, що дорівнює 0,35, то питома витрата умовного палива становила б 0,3514 кг / (кВт · год), що в середньому на 25% вище, ніж у бінарних установках. Зважаючи на це, можна говорити про порівняльну економію палива і, відповідно, про зменшення шкідливих викидів в атмосферу, значення яких також наведені в табл. 2.

Зрозуміло, що ефективність роботи комбінованих установок підвищується в разі завантаження теплових споживачів. За наявності промислових або теплофікаційних споживачів пари з часткою завантаження $\alpha>0$ зменшується витрата палива на вторинний перегрів пари із протитиску базової турбіни й збільшується сумарна потужність, яку віддають споживачам. Для прикладу в табл. 3 і табл. 4 наведено розрахункові значення основних показників роботи бінарних установок в діапазоні $0\leq\alpha\leq 1$ з базовими турбінами Р-6-35/3 і Р-1,5-15/3 відповідно.

Таблиця 3

Показники роботи бінарної установки з базовою турбіною P-6-35 / 3

Показники	Значення α					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Електрична потужність бензолової ПТУ, МВт	15,50	12,41	9,30	6,20	3,11	0
Потужність теплових споживачів, МВт	0	6,58	13,16	19,76	26,32	32,91
Сумарна потужність, віддана споживачам, МВт	21,50	24,99	28,47	31,95	35,43	38,91
Електрична потужність власних потреб, МВт	0,75	0,67	0,62	0,56	0,51	0,46
Витрата умовного палива на вторинний перегрів пари, кг/с	0,16	0,128	0,095	0,064	0,032	0
Сумарна витрата умовного палива, кг/с	1,648	1,616	1,584	1,552	1,520	1,488
Питома витрата умовного палива, кг/ГДж	76,65	64,66	55,61	48,57	42,9	38,25
Коефіцієнт використання теплоти палива	0,445	0,527	0,613	0,702	0,792	0,892

Таблиця 4

Показники роботи бінарної установки з базовою турбіною P-1,5-15/3

Показники	Значення α					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Електрична потужність бензолової ПТУ, МВт	6,40	5,31	3,85	2,56	1,28	0
Потужність теплових споживачів, МВт	0	2,72	5,44	8,16	10,88	13,6
Сумарна потужність, віддана споживачам, МВт	7,90	9,52	10,78	12,22	13,66	15,1
Електрична потужність власних потреб, МВт	0,152	0,131	0,112	0,101	0,090	0,085
Витрата умовного палива на вторинний перегрів пари, кг/с	0,0644	0,0542	0,0386	0,0256	0,0128	0
Сумарна витрата умовного палива, кг/с	0,644	0,634	0,618	0,605	0,593	0,580
Питома витрата умовного палива, кг/ГДж	81,51	66,59	57,28	49,53	43,39	38,4
Коефіцієнт використання теплоти палива	0,418	0,512	0,592	0,689	0,788	0,888

Із наведених таблиць видно, що в міру завантаження теплових споживачів із протитиску базової турбіни зменшуються: електричні потужності бензолової установки і власних потреб; загальні та питомі витрати умовного палива. При цьому збільшуються: сумарна (теплова і електрична) потужність, яку виробляє бінарна установка, і коефіцієнти використання теплоти палива. Більш високий приріст електричної потужності спостерігаємо в установках з нижчими параметрами пари перед базовими турбінами, у яких і більша витрата палива на вторинний перегрів пара із протитиску турбіни. Графічну інтерпретацію деяких показників роботи комбінованих установок, за даними таблиць 3 і 4, наведено на рис. 2 і 3 відповідно.

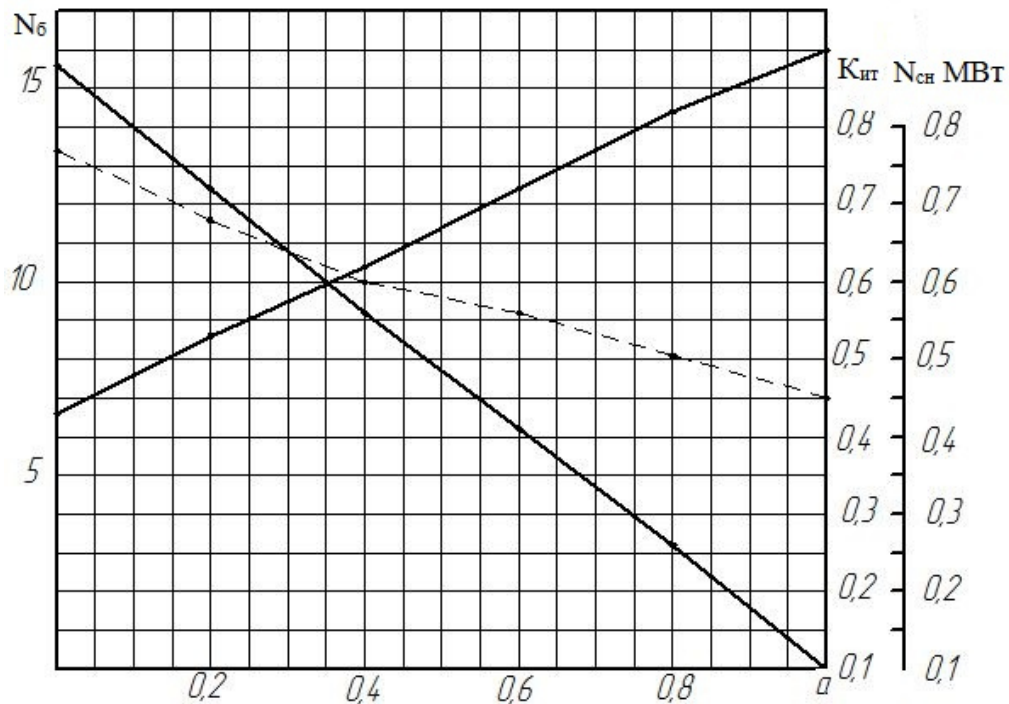


Рис. 2. Характер зміни показників роботи бінарної установки з базовою турбіною P-6-35 / 3: 1 – потужність бензолітової турбіни – N_b , МВт; 2 – потужність власних потреб $N_{вп}$, МВт; 3 – коефіцієнт використання теплоти палива $K_{вт}$

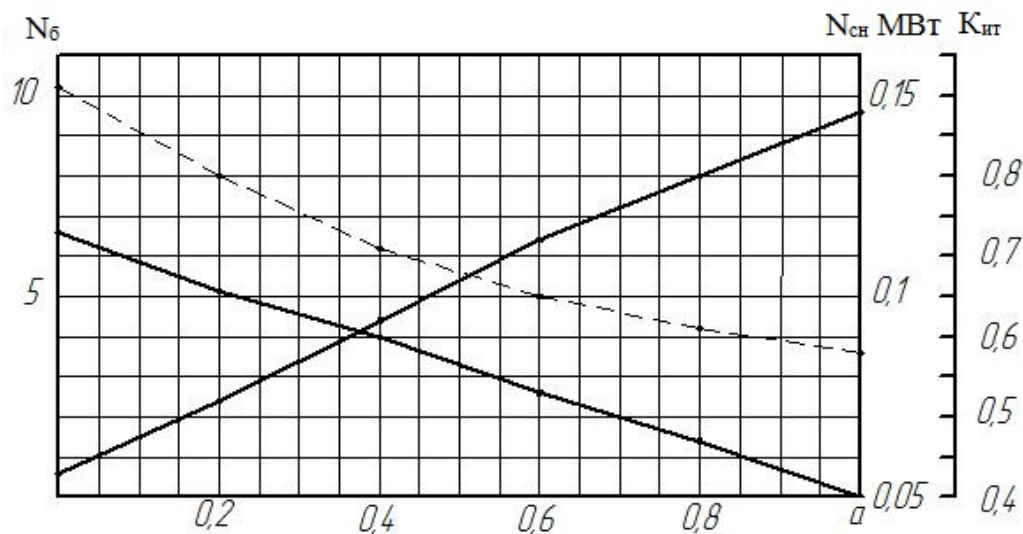


Рис. 3. Характер зміни показників роботи бінарної установки з базовою турбіною P-1,5-15 / 3: 1 – потужність бензолітової турбіни N_b , МВт; 2 – потужність власних потреб $N_{вп}$, МВт; 3 – коефіцієнт використання теплоти палива $K_{вт}$

Закономірності зміни основних показників роботи бінарних установок з НРТ, які працюють з різними параметрами водяної пари перед базовими протитисковими турбінами, аналогічні. Електричні потужності бензолітових турбогенераторів лінійно зростають у міру зниження завантаження теплових споживачів із протитиску базових турбін. При цьому майже лінійно зростають коефіцієнти $K_{вт}$, які характеризують ефективність використання палива в комбінованих установках.

Висновки

1. Застосування бінарних циклів на ТЕЦ з протитисковими турбінами, що мають невисокий тиск водяної пари за турбіною, дозволяє збільшити вироблення електроенергії більш, ніж у три рази.

2. Ефективність виробництва електроенергії на ТЕЦ зазначеного типу в середньому на 25% вище, ніж на електростанціях в енергосистемі, що дозволяє отримати економію палива та зменшення шкідливих викидів в атмосферу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії та використання скидного потенціалу // Відомості Верховної Ради, 2005, – № 20. – С. 275 – 285.
2. Стратегія розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року. – К. : Вид-во Мін-ва палива та енергетики України, 2012. – 156 с.
3. A power general by low-temperature heat recovery // CADDET energy efficiency. Caddet Centre. September, 2002. – 42 p.
4. Сапожников М. Б. Электрические станции на низкотемпературных рабочих телах / М. Б. Сапожников, М. И. Тимошенко // Теплоэнергетика, 2005. – № 3. – С. 73 – 77.
5. Чепурний М. М. Теплоэлектроцентралі на базі газотурбінних установок і парових турбін з низькотемпературним робочим тілом / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 4. – С.21 – 25.
6. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці. / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.
7. ORMAT ENERGY CONVERTER. Technical bulletin, ORMAT JNK, 1990. – 11 p.
8. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1982. – 720 с.

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

Резидент Наталія Володимирівна – к. т. н., доцент, доцент кафедри теплоенергетики.

Олексина Тетяна Михайлівна – студентка інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Возіян Юлія Костянтинівна – студентка інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет.