

М. М. Чепурний, к. т. н., доц.; Н. В. Резидент, к. т. н.; Т. М. Олексина

ТЕПЛОЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛІ НА БАЗІ ПРОТИТИСКОВИХ ПАРОВИХ ТУРБІН І ТУРБІН З НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИМ РОБОЧИМ ТІЛОМ

Визначено показники роботи комбінованих бінарних установок на базі протитискових турбін і турбін, які працюють із низькотемпературним робочим тілом.

Ключові слова: протитискова турбіна, бінарний цикл, теплоелектроцентрально, низькотемпературне робоче тіло, конденсатор, умовне паливо.

Вступ

Загальновідомим є факт, що понад 90 % теплоенергетичного устаткування на теплових електростанціях України вичерпали нормативний ресурс роботи, а близько 70 % його – подвійний. Згідно з перспективним планом розвитку енергетики до 2030 року виробництво електроенергії в країні має збільшитись у 2 – 2,5 рази порівняно з 2005 р. [1]. Нарощення електрогенерувальних потужностей за рахунок реконструкції старих або введення в дію нових енергоблоків потребує значних капіталовкладень, яких в Україні сьогодні немає. Зауважимо також, що через погіршення газопостачання з Росії опалення і гаряче водопостачання в окремих районах може здійснюватися від електрокотелень.

Одним із пріоритетних напрямків модернізації вітчизняної енергетики вважають комбіноване виробництво електроенергії та теплоти на базі наявного теплоенергетичного устаткування невеликої потужності. Саме тут існують реальні можливості застосування нових ефективних технологій за кошти вітчизняних, а не іноземних інвесторів. Серед таких технологій актуальним є застосування бінарних циклів, які працюють на низькотемпературних робочих тілах (НРТ) [2 – 4]. На теренах України працює багато промислових теплоелектроцентралей (ТЕЦ) невеликої потужності з протитисковими турбінами, які постачають водяну пару промисловим переробним підприємствам. Однак на сьогодні склалася ситуація, коли внаслідок скорочення виробництва або його переорієнтації скоротилось або повністю припинилось споживання пари заданого тиску. Насамперед, це стосується турбін з протитиском 1,5 – 1,8 МПа. Використання таких турбін для потреб теплофікації недоцільне через значні втрати теплоти в процесах дроселювання й охолодження пари.

Оскільки в літературі наведено лише окремі загальні принципи застосування бінарних циклів з НРТ, то на підставі вищевикладеного поставлено завдання визначення показників роботи бінарних установок, створених на базі протитискових турбін невеликої потужності та прибудованих паротурбінних установок (ПТУ), які працюють на НРТ.

Основні результати

За базові вибрано типові протитискові турбіни з протитиском 1,5 МПа. Методику розрахунків теплових схем паротурбінних установок викладено в [5]. Для розрахунків вибрано: температуру водяної пари перед турбінами $t_o=435$ °С; початкову ентальпію пари $h_o=3305$ кДж/кг; температуру зворотного конденсату $t_{зк}=103$ °С; температуру живильної води $t_{жв}=104,8$ °С; коефіцієнт корисної дії (ККД) парових котлів – 0,92. Деякі показники роботи ПТУ наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Деякі характеристики і показники роботи базових ПТУ

Показники	Тип турбіни / номер варіанта			
	P-6-35/15	P-4-35/15	P-2,5-35/15	P-1,5-35/15
	1	2	3	4
Потужність електрогенератора, МВт	6	4	2,5	1,5
Температура пари в протитиску, °С	335	338	342	345
Витрата пари на турбіну, т/год	123,5	85,4	56,3	35,5
Теплова потужність промислових споживачів, МВт	89,21	61,81	40,90	25,87
Електрична потужність власних потреб, кВт	652	473	378	226
Витрата умовного палива, т/год	13,272	9,178	6,052	3,815
Питома витрата умовного палива на виробництво електричної та теплової енергії, кг/ГДж	38,72	38,73	38,735	38,74

Принципова теплова схема бінарної установки на базі типової ПТУ і прибудованої ПТУ з низькотемпературним циклом показана на рис.1, де також наведено позначення параметрів теплоносіїв: P – тиск; t – температура; h – ентальпія пари; h' – ентальпія рідини; а також витрат D і G в характерних точках циклів. У якості НРТ вибрано бензол (C_6H_6), бо є фірма, яка проектує і виготовляє турбіни, що працюють на парі бензолу [6].

Паровий котел 1 генерує водяну пару з параметрами P_o , t_o , h_o і витратою D_o . Ця пара надходить в протитискову (базову) турбіну 2. Пара із протитиску турбіни може надходити як до промислових споживачів по лінії 4, так і в бензоловий котел 9, який генерує пару з параметрами P_{δ} , t_{δ} , h_{δ} і витратою D_{δ} .

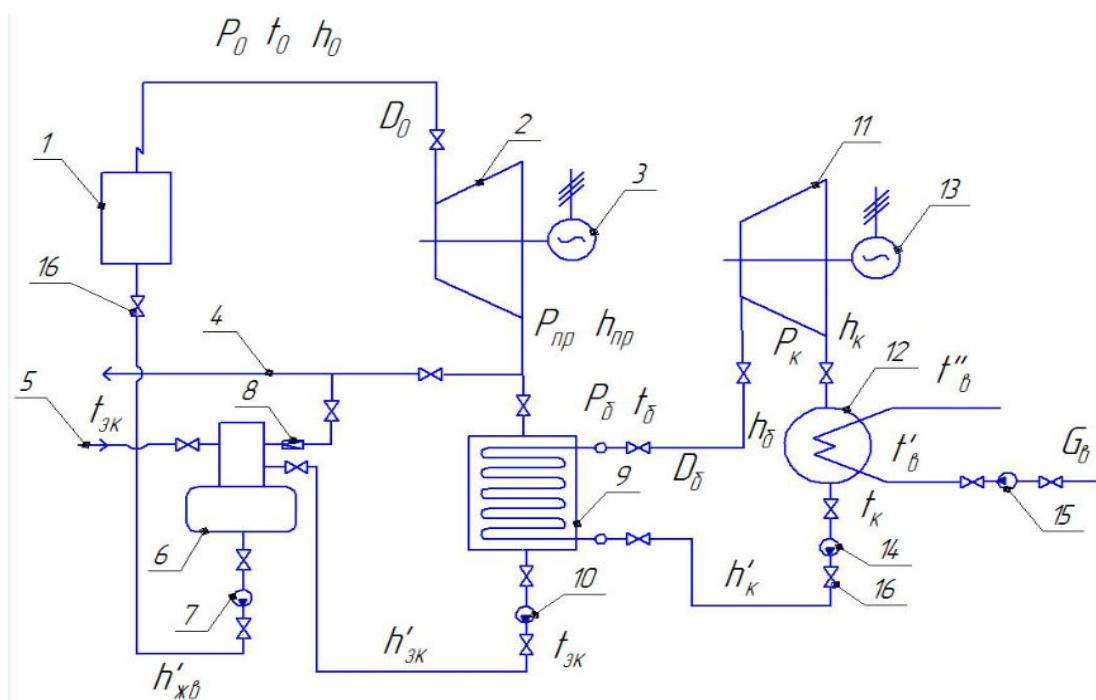


Рис. 1. Принципова теплова схема бінарної установки: 1 – паровий котел; 2 – протитискова турбіна; 3 – електрогенератор; 4 – лінія подачі пари промисловим споживачам; 5 – лінія зворотного конденсату; 6 – деаератор; 7 – живильний насос; 8 – редуктор; 9 – котел бензолової пари; 10 – насос зворотного конденсату; 11 – бензолова турбіна; 12 – конденсатор; 13 – електрогенератор; 14 – конденсатний насос; 15 – циркуляційний (мережний) насос; 16 – запірна арматура

Якщо позначити частку пари, що надходить до промислових споживачів через α , то ви-

трати водяної пари, які надходять до промислових споживачів і в бензоловий котел дорівнюватимуть відповідно:

$$D_{\text{сп}} = \alpha \cdot D_0; D_{\text{бк}} = (1 - \alpha) \cdot D_0. \quad (1)$$

Зворотний конденсат водяної пари з температурою $t_{\text{зк}}$ повертається по трубопроводу 5 і по напірній лінії насоса зворотного конденсату 10. Пара бензолу із котла 9 надходить у турбіну 11, а потім у конденсатор 12. Через конденсатор насосом 15 прокачується охолодна вода, яка підігрівається від температури $t_{\text{в}}$ до температури $t''_{\text{в}}$. Конденсат бензолової пари з параметрами $t_{\text{к}}$ і $h'_{\text{к}}$ за допомогою насоса 14 повертається в котел 9. Якщо конденсацію бензолу здійснювати з тиском $P_{\text{к}} \geq 0,2$ МПа, то температура конденсації перевищує 100 °С. У цьому разі конденсатор може працювати як джерело теплофікації, підігріваючи зворотну мережну воду. Така комбінована установка буде називатись установкою з теплофікаційним бінарним циклом. Отже, слід розрізняти два типи комбінованих установок: 1) із чисто конденсаційним бінарним циклом; 2) із теплофікаційним бінарним циклом.

Методика розрахунків бінарних циклів висвітлена в [7]. Розглянемо спочатку особливості роботи бінарних установок першого типу для випадку, коли бензолова ПТУ виробляє тільки електроенергію. Для цього вибрані такі параметри бензолової пари: $P_{\text{б}} = 0,6$ МПа; $t_{\text{б}} = 327$ °С; $h_{\text{б}} = 656$ кДж/кг; $P_{\text{к}} = 0,0135$ МПа; $t_{\text{к}} = 25$ °С; $h_{\text{к}} = 183$ кДж/кг [8]. Перепад температури води в конденсаторі складає 12 °С. Результати розрахунків роботи установок першого типу за умови $\alpha = 0$ (уся пара з протитиску базової турбіни надходить у бензоловий котел) наведено в табл. 2, де нумерація варіантів відповідає нумерації варіантів турбін у табл. 1.

Таблиця 2

Показники роботи установок із чисто конденсаційним бінарним циклом ($\alpha = 0$)

Показники	Варіанти			
	1	2	3	4
Витрата бензолу, кг/с	98,83	68,47	45,31	28,86
Електрична потужність бензолової ПТУ, МВт	43,11	29,81	19,75	12,49
Електрична потужність власних потреб бензолової ПТУ, кВт	385	267	175	112
Електрична потужність власних потреб бінарної установки, кВт	1037,2	739,8	553	337,6
Загальна електрична потужність, вироблена бінарною установкою, МВт	49,1	33,8	22,25	13,995
Питома витрата умовного палива: кг/ГДж; кг/(кВт·год)	75,07	75,42	75,55	75,74
	0,2673	0,271	0,272	0,2725
Річна економія умовного палива на виробництво електроенергії порівняно з її виробництвом в енергосистемі, т/рік	31609	20996	11650	8954
Річне зменшення викидів, т/рік: окису вуглецю; двоокису вуглецю; оксидів азоту	3,87	2,484	1,378	1,11
	6757	4378	2408	1915
	7,652	4,948	2,725	2,169

Насамперед, привертає увагу восьмикратний приріст електричної потужності за рахунок здійснення бінарного циклу. Разом з тим, за відсутністю промислових споживачів водяної пари зростає питома витрата умовного палива на одиницю виробленої енергії, хоча додаткову електричну потужність і виробляють без додаткової витрати палива.

Але якби цю додаткову потужність виробляли на електростанціях енергосистеми з ККД 0,35, то питома витрата умовного палива складала б 97,6 кг/ГДж або 0,3154 кг/(кВт·год). У цьому разі річна економія умовного палива порівняно з виробництвом електроенергії в енер-

госистемі має складати, т/рік.

$$\Delta B = (0,3514 - b) \cdot N_b \cdot \tau_p, \quad (2)$$

де b – питома витрата умовного палива на комбінованій бінарній установці, N_b – потужність бензолісової ПТУ, МВт; τ_p – річна кількість робочих годин.

Відповідно до цієї економії палива мали б зменшитися шкідливі викиди в атмосферу. За умови, що робочим паливом є природний газ із теплою згорання на суху масу $33,4$ МДж/м³ і теоретичними об'ємами повітря $V^o=9,52$ м³/м³ і газів $V^o_r=10,6$ м³/м³, величини цих викидів обчислено за ГДК 34.02.305-2002 «Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок» і також наведено в табл. 2.

До недоліків роботи бінарних циклів за розглянутими варіантами за $\alpha = 0$ належать дуже великі витрати НРТ, які зумовлюють невиправдану громіздкість устаткування бензолісової ПТУ, збільшення витрат електроенергії на власні потреби, зменшення ефективності роботи порівняно з базовим циклом. Ці недоліки деякою мірою можна усунути в разі завантаження промислових споживачів пари із протитиску базової турбіни, тобто за умови роботи $0 < \alpha < 1$.

На рис. 2 для прикладу наведені закономірності зміни основних показників бінарної установки з базовою турбіною Р-4-35/15 (варіант 2 в табл. 1) залежно від значень α .

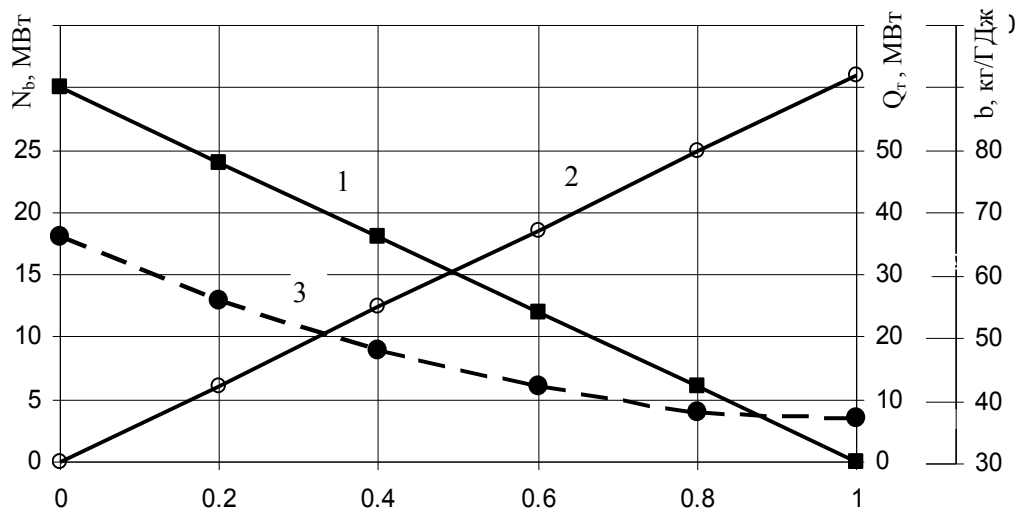


Рис. 2. Поточні значення: електричної потужності бензолісової ПТУ – N_b (лінія 1); теплової потужності, відпущеної промисловим споживачам – Q_T (лінія 2); питомої витрати умовного палива – b (лінія 3)

Із рис. 2 наочно видно, що зі збільшенням частки пари, яка надходить до промислових споживачів, електрична потужність бензолісової ПТУ лінійно зменшується, а теплова потужність бінарної установки лінійно зростає. При цьому темп зростання Q_T випереджає темп зменшення N_b . Унаслідок цього збільшується сумарна (теплова + електрична) потужність, яку виробляють на ТЕЦ із бінарним циклом, а, отже, і ефективність її роботи. За умови $\alpha = 0$ значення показників роботи бінарної установки відповідають значенням, наведеним у табл. 2, а за умови $\alpha = 1$ – значенням, наведеним у табл. 1.

Аналогічні закономірності зміни показників роботи установок з бінарним конденсаційним типом спостерігаємо і для інших варіантів із базовими протитисковими турбінами, наведеними в табл. 1. Оптимальними режимами роботи бінарних установок слід вважати режими, коли $\alpha = 0,5 - 0,6$. При цьому електрична потужність зростає у 2 – 2,35 рази і приблизно в стільки ж разів зменшується громіздкість і вартість устаткування бензолісової ПТУ.

Ефективність роботи бінарної установки, яка характеризується питомою витратою умовного палива, зростає в 1,5 – 1,65 рази.

Розглянемо тепер особливості роботи бінарних установок із теплофікаційним циклом. Для цього випадку вибираємо такі параметри пари бензолу: $P_{\delta} = 1$ МПа; $t_{\delta} = 327^{\circ}\text{C}$; $h_{\delta} = 651,4$ кДж/кг; $P_{\kappa} = 0,215$ МПа; $t_{\kappa} = 117^{\circ}\text{C}$; $h_{\kappa} = 365$ кДж/кг [8]. Теплофікаційна потужність бензолової ПТУ дорівнюватиме потужності конденсатора з урахуванням його ККД. У конденсаторі зворотну мережну воду системи теплофікації з температурою 55°C підігрівають до температури 110°C і спрямовують до споживачів гарячої води. У табл. 3 наведені результати розрахунків основних показників роботи бінарних установок зазначеного типу за умови, що вся пара із протитиску надходить у бензоловий котел.

Дані, наведені в табл. 3, свідчать про те, що застосування теплофікаційного бінарного циклу підвищує ефективність роботи ТЕЦ унаслідок збільшення сумарної теплової та електричної потужності. Слід зазначити збільшення витрат НРТ і витрат електроенергії на власні потреби. При цьому ускладнюється проблема реалізації цього варіанта на практиці, тому, як і в першому випадку, розглянемо роботу комбінованої установки в діапазоні $0 < \alpha < 1$.

Таблиця 3

Показники роботи бінарної установки з теплофікаційним циклом ($\alpha=0$)

Показники	Номер варіанта			
	1	2	3	4
Витрата бензолу, кг/с	117,38	81,32	53,81	34,04
Електрична потужність бензолової ПТУ, МВт	31,45	21,79	14,42	9,12
Теплофікаційна потужність, МВт	46,95	32,53	21,52	13,61
Електрична потужність власних потреб бензолової ПТУ, кВт	459	254	232	148
Електрична потужність власних потреб ТЕЦ, МВт	1,111	0,827	0,610	0,374
Сумарна потужність, вироблена бінарною установкою, МВт	84,402	58,326	38,440	24,237
Питома витрата умовного палива, кг/ГДж	43,68	43,70	43,73	43,74

На рис. 3, як і на рис. 2, для прикладу побудовано розрахункові залежності зміни основних показників роботи бінарної установки з теплофікаційним циклом на основі базової турбіни Р-4-35/15.

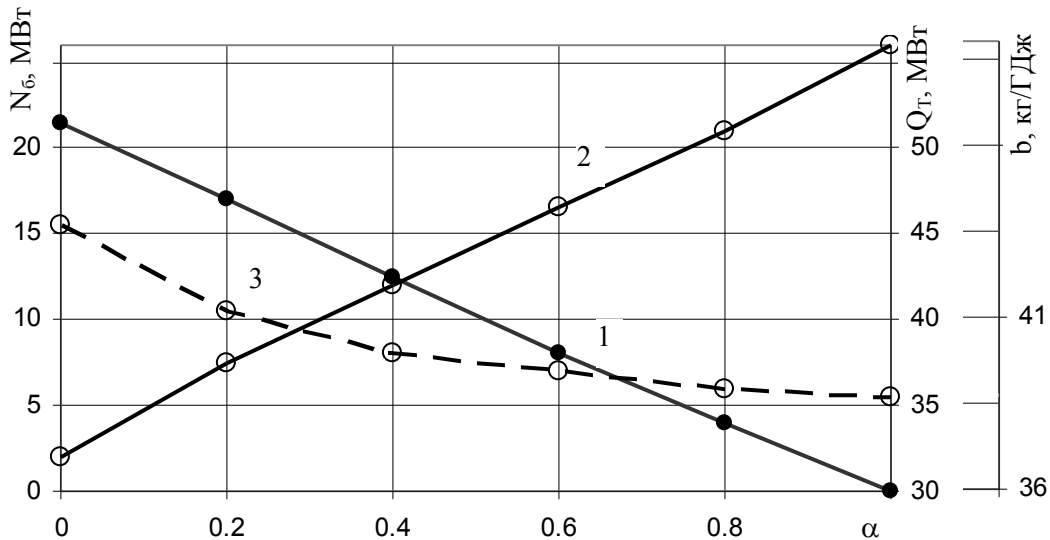


Рис. 3. Значення основних показників роботи бінарної установки з теплофікаційним циклом (позначення на рис. 2.)

Тут, як і раніше, граничним умовам $\alpha = 0$ і $\alpha = 1$ відповідають значення показників роботи, наведених у табл. 3 і табл. 1 відповідно.

Аналогічні співвідношення справедливі й для інших варіантів бінарних установок із базовими протитисковими турбінами. Ефективність роботи установок із теплофікаційним бінар-

ним циклом на 20 – 25 % більша за ефективність установок із конденсаційним циклом. Установкам із теплофікаційним бінарним циклом властиві недоліки, зазначені для установок із конденсаційним циклом. Оптимальними режимами роботи розглянутих установок можна вважати режими з $\alpha = 0,6$.

Зауважимо, що бінарні установки на базі протитискових турбін, які мають значні витрати водяної пари, не можуть бути реалізованими на практиці за умови, що вся пара витрачається на генерацію НРТ.

Зазначимо також, що бінарні цикли можна здійснити на базі протитискових турбін з більш низьким протитиском (0,3 – 0,7 МПа) і меншими витратами пари. Однак у цьому випадку виникає необхідність повного або часткового перегріву пари із протитиску до температур 340 – 350 °С. Такі варіанти потребують окремого розгляду.

Висновки

1. Застосування бінарних установок із НРТ дозволяє суттєво збільшити виробництво електроенергії без додаткового спалювання палива.
2. Застосування теплофікаційних бінарних циклів на 20 – 25% ефективніше, ніж конденсаційних.
3. Для розглянутих варіантів практична реалізація бінарних циклів за умови, що вся пара із протитиску базових турбін витрачається на генерацію пари НРТ, досить проблематична.
4. Найекономічнішими режимами роботи зазначених установок є режими з $\alpha = 0,6$.
5. Отримані результати – необхідна передумова для розв'язання питання доцільності застосування бінарних установок із НРТ на базі протитискових турбін зі значним тиском пари із протитиску.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стратегія розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року. – К. : Вид-во Мін-ва палива та енергетики України, 2006. – 123 с.
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. Н. Тимошенко // Теплоэнергетика. – 2005. – N 3. – С.73 – 77.
4. 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. – N 4. – С. 21 – 25.
5. Чепурний М. М. Розрахунки теплових схем ТЕЦ та ефективності при їх модернізації / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця: ВДТУ, 1997. – 61 с.
6. ORMAT ENERGY CONVERTER. Technical bulletin. ORMAT INK, 1990. –11 p.
7. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.
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 кафедри теплоенергетики.

Олексина Тетяна Михайлівна – студентка інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання. Вінницький національний технічний університет.