

УДК 621.311:531

М. М. Чепурний, к. т. н., доц.;

О. В. Антропова, студ.

ЗАСТОСУВАННЯ БІНАРНИХ ЦИКЛІВ НА ТЕЦ

Викладено результати порівняльних розрахунків бінарних циклів з органічним низькотемпературним теплоносієм на базі паротурбінних установок, які працюють на теплоелектроцентралях.

Стан проблеми

Теперішній скрутний стан вітчизняної енергетичної галузі зумовлений багатьма причинами: дефіцитом власних паливних ресурсів, зношеністю енергетичного устаткування, значними втратами енергії під час її транспортування, дефіцитом маневрених потужностей в електричній системі та ін. Зазначене призвело до збільшення витрат палива на одиницю виробленої енергії, що, в свою чергу, викликало погіршення екологічної обстановки. Поступове зростання цін на паливо тільки посилює ці негативні тенденції. Підйом економіки України потребує як заміни, так і модернізації існуючих електрогенерувальних потужностей. Одним із напрямків підвищення ефективності використання палива на теплових електростанціях (ТЕС) є комбінування.

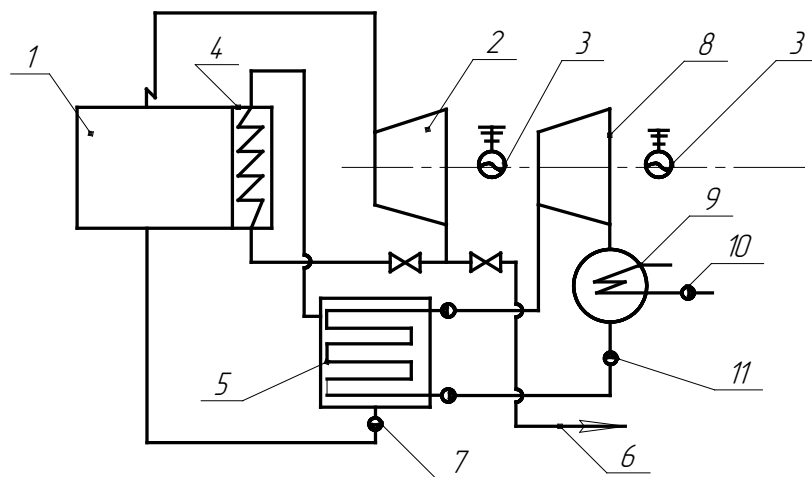
Ідея сумісного виробництва видів енергопродукції (електроенергії та теплоти) запропонована ще в першій половині минулого століття і передбачала зменшення питомих витрат палива на виробництво і відпуск зазначених видів енергопродукції. Ця ідея була реалізована шляхом будівництва теплоелектроцентралей (ТЕЦ). Однак тепер склалась ситуація, коли в результаті зменшення споживання технологічної пари промисловими підприємствами, стало важко виробляти проектні електричні потужності на ТЕЦ. В результаті цього ефект системної економії палива значно зменшується. В окремих випадках енергоблоки, оснащені протитисковими турбінами, вилучаються з роботи. Друга складова паливного ефекту від комбінованого виробництва електроенергії та теплоти виявилась нижче проектної через великі втрати енергії в процесі транспортування теплоти. Викладене наводить на думку про те, що експлуатація промислових ТЕЦ так чи інакше зв'язана з деяким змертвлінням капіталів. Нарощення електричних потужностей за рахунок введення в дію нових енергоблоків на атомних станціях тільки посилює проблему нестачі маневрених потужностей в енергосистемі, дефіцит яких на даний момент складає біля 1500 МВт. Зважаючи на вищезазначене, головним способом оздоровлення національної енергетики є використання високоефективних енерго- і ресурсозбережних технологій, які не потребують великих капіталовкладень і, на жаль, не інвестуються та не впроваджуються в країні.

Початок ХХІ сторіччя в світовій енергетиці характеризується намаганням ефективного використання енергоресурсів. При цьому, крім удосконалення технології первинної енергії (теплоти) велика увага приділяється використанню вторинної теплоти, яка викидається в довкілля. Актуальними стають проблеми використання скидної низькотемпературної теплоти для виробництва електроенергії. Поширюються електростанції, які працюють на низькотемпературних робочих тілах (НРТ) [1—5]. До складу таких НРТ відносять органічні теплоносії (фреони, ізобутан, пентан бензол тощо), температура пароутворення яких в 3—4 рази менша, ніж у води. Виробництво електроенергії на таких електростанціях здійснюється за допомогою бінарних циклів. У високотемпературній частині бінарного циклу (першому термодинамічному циклі) використовується теплоносій з більш високими параметрами пари, а в низькотемпературній частині (другому термодинамічному циклі) — теплоносій з меншою температурою пароутворення і меншими параметрами пари. В бінарному циклі такого типу збільшення виробництва електроенергії досягається за рахунок повного або часткового використання теплоти конденсації відпрацьованої в турбіні першого циклу пари високотемпературного теплоносія. Внаслідок цього генерується пара низькотемпературного теплоносія, яка надходить в парову турбіну другого циклу.

Для реалізації зазначених циклів перш за все потрібно мати низькотемпературну парову турбіну, яка є головним високотехнологічним елементом бінарної установки. Інженерно-технологічний потенціал для розробки і виготовлення турбін, які працюють на НРТ мають: США, Росія, Німеччина, Італія. Електрична потужність таких турбін лежить в діапазоні 0,2—7 МВт. Електростанції з бінарними циклами працюють уже в 17 країнах світу, переважно в США. Понад 90 % електроста-

нцій на НРТ належать геотермальним установкам, а 10 % — електростанціям утилізаційного типу, які використовують скидну теплоту від промислових підприємств. Застосування останніх можна вважати найперспективнішими. Зазначимо також, що завдяки більшим значенням густини пари НРТ, парові турбіни другого циклу компактніші, ніж турбіни, які працюють на водяній парі. Застосування бінарних циклів дає можливість суттєво нарощувати електричну потужність ТЕЦ без додаткового спалювання палива і без значних капітальних витрат.

Основні результати



Принципова теплова схема бінарної установки з НРТ і протитисковою паровою турбіною: 1 — паровий котел; 2 — протитискова турбіна; 3 — електрогенератор; 4 — вторинний пароперегрівник; 5 — конденсатор-випарник; 6 — лінія до споживачів водяної пари; 7 — живильний насос пароводяного циклу; 8 — турбіна з НРТ; 9 — конденсатор пари НРТ; 10 — циркуляційний насос; 11 — живильний насос циклу з НРТ

Внаслідок менших значень теплоти пароутворення НРТ, витрати пари в другому циклі значно зростають в порівнянні з витратами пари в пароводяному циклі, що призводить до збільшення металосмості та здорожчання бінарної установки. В [4] запропоновано перш за все підвищувати температуру пари в пароводяному циклі, що дає змогу підвищити робочий тепलोперепад в турбіні та зменшити витрату пари на турбіну першого циклу. Попередні розрахунки показали, що такий засіб не дає помітних результатів. Крім того, реалізація його потребує реконструкції існуючого енергетичного устаткування (парового котла, парової турбіни) та заміни допоміжного устаткування.

В зв'язку з цим пропонується схема з вторинним перегрівом відпрацьованої в турбіні водяної пари, яка призначена для реалізації бінарного циклу з НРТ (рис.).

Така схема не потребує реконструкції теплоенергетичного устаткування, а паровий котел оснащується лише додатковим пароперегрівником, що легко реалізується на практиці. До того ж наявність вторинного підігрівника дозволяє ефективніше утилізувати теплоту продуктів згорання в котлі за рахунок зменшення температури відхідних газів. В разі застосування конденсаційних турбін з промисловим відбором водяної пари, на вторинний перегрів має надходити пара з промислового відбору. Первинна водяна пара генерується в котлі 1 і надходить на турбіну 2, яка обертає електрогенератор 3. Частина, або вся відпрацьована в турбіні 2 водяна пара, спрямовується на вторинний пароперегрівник 4, де її температура підвищується до певного значення, після чого надходить в конденсатор-випарник 5, де, конденсуючись, генерує перегріту пару НРТ. Ця пара надходить в турбіну 8, яка обертає свій електрогенератор. Відпрацьована пара НРТ конденсується в конденсаторі 9, через який циркуляційним насосом прокачується холодна вода. Конденсат НРТ живильним насосом 11 повертається в конденсатор-випарник 5. За допомогою живильного насоса 7 конденсат водяної пари повертається в паровий котел 1.

Для ефективного використання бінарних установок з НРТ в кожному конкретному випадку необхідно визначити раціональне співвідношення між параметрами у високотемпературній та низькотемпературній частинах циклу. Двигунами для вторинного циклу вибрані турбіни фірми ORMAT, які працюють на парі бензолу (C_6H_6) і добре зарекомендували себе на практиці. Аналізуючи теплофізичні властивості бензолу, за [7] визначені найпридатніші параметри його пари в циклі: перед турбіною — тиск 0,4 МПа, температура 325 °С; за турбіною — тиск 0,0139 МПа, температура 27 °С. Враховуючи величину недогріву в конденсаторі-випарнику, яка оцінюється в 70...80 °С, температура водяної пари після вторинного перегріву вибрана рівною 400 °С. Здійснені

розрахунки основних показників роботи бінарних установок на базі найбільш поширених на практиці протитискових турбін і турбін з промисловим відбором пари, які експлуатуються на ТЕЦ невеликих потужностей. Параметри та характерні показники їх роботи визначені за номенклатурними даними заводів-виготовників. Вважалось, що внутрішні відносні коефіцієнти корисної дії пароводяних і паробензолових турбін однакові; ККД парогенераторів — 0,91. При цьому парові котли можуть працювати на будь-якому із видів органічного палива (твердому, рідкому або газоподібному). Розрахунки теплових схем паротурбінних установок виконувались за методикою, викладеною в [8, 9] за умови, що вся пара з протитиску або з промислових відборів турбін надходить в конденсатор-випарник. Результати розрахунків зведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Показники роботи бінарних енергетичних установок

Показники	Тип турбіни пароводяного циклу							
	P-1,5-15/3	P-2,5-15/3	P-2,5-35/3	P-4-35/3	P-6-35/3	П-2,5-35/5	П-4-35/5	ПТ-12-90/10
Електрична потужність, МВт	1,5	2,5	2,5	4	6	2,5	4	12
Параметри водяної пари перед турбіною: тиск, МПа, температура, °С	1,47 350	1,47 350	3,43 435	3,43 435	3,43 435	3,43 435	3,43 435	8,82 535
Витрата пари на турбіну, т/год.	21,8	32,3	23	33	50	26,3	36	82,6
Витрата пари в промисловому відборі, т/год.	—	—	—	—	—	18	25	35
Витрата умовного палива на пароводяний цикл, т/год.	2,23	3,31	2,49	3,56	5,33	2,83	3,86	8,78
Витрата умовного палива на бінарну установку, т/год.	2,54	3,77	2,8	4,05	6,04	3,05	4,18	9,1
Витрата НРТ, т/год.	65	96,4	63	96	146	52	72	96
Електрична потужність циклу з НРТ, МВт	6,6	9,8	6,3	8,1	14,8	5,3	7,3	9,75
Електрична потужність приводів насосів в циклі з НРТ, кВт: живильного; циркуляційного	16,1 63,4	23,8 93,9	15,5 60,6	23,7 93,5	36 142,4	12,8 50,6	17,8 70	24 96
Загальна електрична потужність бінарної установки, МВт	8,1	12,3	12,3	12,1	20,8	7,8	11,3	21,75
Економія умовного палива в порівнянні з виробництвом загальної потужності на турбінах зазначеного типу, т/год.	9,5	12,5	9,45	6,72	12,43	4,78	6,72	6,81

Із табл. 1 видно, що при незначних додаткових витратах палива, зв'язаних із вторинним перегрівом водяної пари, і електроенергії на власні потреби, застосування бінарних установок з НРТ в другому циклі дозволяє збільшити установлену електричну потужність первинного циклу в 1,8—4,9 рази. Найбільший приріст електричної потужності спостерігається для прититискових турбін малої потужності, які працюють з нижчими параметрами водяної пари.

Зауважимо однак, що цей приріст супроводжується вищими додатковими витратами палива та НРТ. Зі збільшенням початкових параметрів водяної пари в протитиску або в промисловому відборі турбін потужність циклу з НРТ зменшується. При цьому зменшується додаткова витрата палива на бінарну установку внаслідок зменшення теплоти, необхідної для вторинного перегріву пари. У випадках часткового використання пари з протитиску або з промислового відбору турбін,

додаткова витрата палива і електрична потужність циклу з НРТ зменшується прямопропорційно витраті пари на вторинний пароперегрівник і конденсатор-випарник.

Для промислових ТЕЦ з протитисковими турбінами, що мають теплофікаційне навантаження, відпуск теплоти з гарячою водою може здійснюватись із конденсатора НРТ. В цьому разі тиск в останньому підвищується до 0,165 МПа, а температура конденсації бензолу дорівнюватиме 97 °С. Це дає змогу підігріти охолодну воду до температури 93 °С. Охолодна вода в даному випадку є теплоносієм (мережною водою) системи теплофікації. Зрозуміло, що за рахунок збільшення тиску в конденсаторі зменшується робочий тепलोперепад в турбіні другого циклу, а, отже, зменшується його електрична потужність. В табл. 2 для порівняння наведені основні показники бінарних теплофікаційних установок з тими ж протитисковими турбінами, що зазначені в табл. 1.

Таблиця 2

Показники роботи теплофікаційних бінарних установок з протитисковими турбінами

Показники	Тип пароводяної турбіни				
	P-1,5-15/3	P-2,5-15/3	P-2,5-35/3	P-4-35/3	P-6-35/3
Витрата умовного палива на бінарну установку, т/год.	2,54	3,77	2,8	4,05	6,04
Витрата НРТ, т/год.	55,4	82,18	53,7	81,84	124,46
Електрична потужність циклу з НРТ, МВт	4,58	6,8	4,375	5,625	10,277
Загальна електрична потужність бінарної установки, МВт	6,08	9,3	6,875	9,625	16,277
Теплофікаційна потужність бінарної установки, МВт	5,7	8,456	5,52	8,42	12,8
Відношення потужності теплофікації до електричної потужності бінарної установки	0,838	0,909	0,8	0,87	0,786

Дані табл. 2 свідчать про те, що для однакової витрати палива на бінарних установках виробництво електроенергії на теплофікаційних установках зменшується в цілому на ТЕЦ на 25 %. Разом з тим відпущена теплова потужність складає 79...90 % від виробленої електроенергії.

Наведені розрахункові дані дають можливість попередньої оцінки ефективності застосування бінарних установок на ТЕЦ певної структури. Впровадження таких установок особливо доцільне на ТЕЦ із сезонним графіком роботи (наприклад, на ТЕЦ цукрових заводів), які отримують можливість цілорічної роботи. Це позбавляє необхідності будівництва нових електрогенерувальних потужностей меншої ефективності.

Висновки

1. Застосування бінарних установок з НРТ на базі промислових ТЕЦ дозволяє в залежності від їх структури збільшити виробництво електроенергії майже з незмінною витратою палива.
2. В теплофікаційних бінарних установках виробництво електроенергії зменшується на 25 %, а теплофікаційна потужність наближається до їх електричної потужності.
3. Наявність зазначених установок сприяє покриттю дефіциту маневрених електричних навантажень в енергосистемі та переходу на цілорічну роботу промислових ТЕЦ із сезонним графіком роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поваров О. А. Бинарные электрические станции / О. А. Поваров, А. И. Саакян, А. И. Никольский // Тяжелое машиностроение. — 2002. — №8. — С. 13—15.
2. Билека Б. Утилизация сбросной теплоты ГПА в установках с низкокипящими рабочими телами / Б. Билека, Е. Васильев, В. Кабанов // Газотурбинные технологии. — 2002. — № 5. — С. 6—10.

3. A power generation system by low-temperature waste heat recovery // Caddet energy efficiency. Caddet Centre. September 2002, — 42 p.
4. Синякевич Б. Г. Бінарний цикл перетворення енергії як один із шляхів підвищення ефективності роботи електростанцій / Б. Г. Синякевич, З. С. Гелетій, Акімов А. А. // *Енергетика и электрификация*, 2004. — №2. — С. 33—36.
5. Сапожников М. Б. Электрические станции на низкокипящих рабочих телах / М. Б. Сапожников, М. И. Тимошенко // *Теплоэнергетика*. — 2005. — № 3. — С.73—77.
6. ORMAT ENERGI CONVERTER. Technical bulletin, ORMAT INK, 1990. — 11 p.
7. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. — М.: Наука, 1982. — 720 с.
8. Чепурний М. М. Розрахунки теплових схем когенераційних установок / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, В. В. Бужинський. — Вінниця: ВНТУ, 2003. — 104 с.
9. Чепурний М. М. Розрахунки теплових схем ТЕЦ та ефективності при їх модернізації / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. — Вінниця: ВДТУ, 1997. — 61 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 06.03.08
Рекомендована до друку 02.04.08

Чепурний Марко Миколайович — професор кафедри теплоенергетики,
Антропова Олена Володимирівна — студентка Інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет