

УДК 662.987.697.7

А.С. Денисова, д-р техн. наук, проф.,
В.Ю. Бірюк, магістр,
Одес. нац. політехн. ун-т

АНАЛІЗ ПАРОКОМПРЕСІЙНОГО ЦИКЛУ ТЕПЛОНАСОСНИХ СТАНЦІЙ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

А.С. Денисова, В.Ю. Бірюк. Аналіз парокompресійного циклу теплонасосних станцій теплопостачання. Розглянуто показники ефективності парокompресійного циклу теплонасосної станції теплопостачання для умов технологічної схеми електростанції. Проаналізовано можливість утилізації теплоти циркуляційної води охолодження конденсаторів парових турбін за допомогою теплових насосів для потреб централізованого та внутрішнього теплопостачання.

Ключові слова: енергозберігаючі технології, енергетична безпека, фреон, паротурбінний цикл, теплонасосні станції теплопостачання, холодопродуктивність, ексергія.

А.Е. Денисова, В.Ю. Бирюк. Анализ парокompрессионного цикла теплонасосных станций теплоснабжения. Рассмотрены показатели эффективности парокompрессионного цикла теплонасосной станции теплоснабжения для условий технологической схемы электростанции. Проанализированы возможность утилизации теплоты циркуляционной воды охлаждения конденсаторов паровых турбин с помощью тепловых насосов для системы централизованного и внутреннего теплоснабжения.

Ключевые слова: энергосберегающие технологии, энергетическая безопасность, фреон, паротурбінний цикл, теплонасосные станции теплоснабжения, холодопроизводительность, эксергия.

A.E. Denysova, V.Y. Biriuk. Analysis of vapor compression cycle of heat pump heating plants. The performance indicator of vapor compression cycle of a heat pump heating station are considered for the conditions of power plant flowsheet. Analyzed is possibility of utilizing the heat of circulating water, used for cooling steam turbine condensers with heat pumps, for district and domestic heating system.

Keywords: Energy-saving technologies, Energy security, Freon, Steam turbine cycle, Heat pump heating station, Cooling capacity, Exergy.

Частка споживання газу у вітчизняному промисловому комплексі залишається на високому рівні. Більше половини енергетичних потреб країни вирішується за рахунок спалювання природного газу. У світлі енергетичної кризи актуальним є питання щодо ефективного енергоспоживання енергоносіїв, розробки та впровадження новітніх енергозберігаючих технологій. Одним із рішень зазначеної проблеми, що стосується енергозбереження, є застосування теплонасосних технологій на енергетичних та промислових підприємствах для отримання теплоти з використанням вторинних низькопотенційних джерел технологічних процесів [1, 2].

Відсутній досвід використання теплонасосних технологій в технологічних схемах виробництва електроенергії і теплоти. Деякі пропозиції носять декларативний характер і не дають змоги оцінити перспективи застосування теплонасосних технологій в теплових схемах електростанцій і промислових підприємств як для підвищення термодинамічної ефективності паросилового циклу електростанцій, так і для підвищення ефективності централізованого теплопостачання.

Тому важливим є завдання розробки методики аналізу ефективності теплових процесів в теплових схемах підприємств із застосуванням теплонасосних технологій. Це дасть змогу, за умов їх впровадження, оцінити ефективність обраних схем та обрати шляхи їх оптимізації на основі використання ексергетичного методу для проектування високоефективного енерготехнологічного обладнання [3].

Найбільш перспективним напрямком застосування теплових насосних станцій теплопостачання (ТНСТ) на електростанціях є утилізація низькопотенційної теплоти циркуляційної води охолодження конденсаторів турбін. Температура циркуляційної води після конденсаторів

в оборотній системі циркуляційного водозабезпечення, що характерна для умов Рівненської АЕС, коливається в діапазоні 20...30 °С в залежності від пори року, що є високоефективним джерелом теплоти для ТНСТ.

При застосуванні парокомпресійного циклу ТНСТ можна отримати теплоносій з температурою 60...75 °С. Отримання таких параметрів дає можливість використовувати ТНСТ для потреб централізованого і внутрішнього теплопостачання електростанції, не використовуючи при цьому відбори пари з турбоустановки на теплофікацію. Це дасть можливість зменшити коефіцієнт недовироблення електроенергії турбоустановкою та, водночас, ефективно виробляти теплову енергію для потреб централізованого теплопостачання. Для таких ТНСТ необхідно знайти оптимальні показники роботи, щоб визначити економічну доцільність їх запровадження в промисловості та енергетиці.

Для вибору найбільш ефективного робочого тіла парокомпресійного циклу ТНСТ при заданих умовах, необхідно провести аналіз парокомпресійних циклів з різними типами фреонів. Однак для визначення ефективного робочого тіла необхідно також врахувати екологічну безпеку використання даних фреонів. Тому для аналізу парокомпресійних циклів розглядатимемо фреони, що відповідають міжнародним нормативним документам з екологічності, зокрема Монреальському протоколу [4]. Для аналізу ефективності робочого тіла обираємо екологічно безпечну групу фреонів R134, R134a, R152a, R143a, R125, R32, R23, R218, R116, RC318, R290, R600, R600a, R717 та ін.

При виборі холодоносу для ТНСТ важливим є діапазон робочих температур. При температурах вище за критичну точку фреон не використовується. Коефіцієнт перетворення теплоти ϕ теплового насоса визначається властивостями фреону. Чим вище необхідні температури кипіння і випаровування до критичної точки, тим коефіцієнт ϕ нижче, але чим температура далі від критичної точки, тим більше витрата хладона [5].

Отже при виборі найбільш ефективного робочого тіла для ТНСТ слід враховувати ряд чинників, зокрема екологічну, енергетичну та економічну ефективність [6].

Для розрахунку показників ефективності парокомпресійних циклів вибираємо діапазон температур випаровування $t_v=20...30$ °С, що відповідає температурі циркуляційної води в оборотній системі водозабезпечення на протязі року та температуру конденсації $t_k=75$ °С для систем теплопостачання. Для визначення показників ефективності парокомпресійного циклу ТНСТ необхідно проаналізувати:

Роботу стиснення в компресорі, кДж/кг:

$$l_{ст} = h_2 - h_1,$$

де h_1 — ентальпія робочого тіла на вході в компресор, кДж/кг;

h_2 — ентальпія робочого тіла на виході з компресора, кДж/кг.

Рівняння теплового балансу ТНСТ циклу, кДж/кг:

$$q_v + l_{ст} = q_k,$$

де q_v — теплове навантаження у випарнику ТНСТ, кДж/кг;

q_k — теплове навантаження у конденсаторі ТНСТ, кДж/кг.

Теплове навантаження ТНСТ, кДж/кг:

$$q_{тн} = q_k.$$

Питому енергію, спожиту електродвигуном компресора ТНСТ, кДж/кг:

$$W = l_{ст} / \eta_{ем} \eta_{е},$$

де $\eta_{ем}$ — ККД електромеханічний;

$\eta_{е}$ — ККД електричний.

Енергетичну ефективність парокомпресійного циклу ТНСТ, коефіцієнт перетворення:

$$\phi = q_k / l_{ст}.$$

Проаналізувавши парокомпресійний цикл ТНСТ з різними фреонами отримуємо показники ефективності циклу (табл. 1).

Таблиця 1

Показники ефективності парокомпресійного циклу ТНСТ

Фреон	Питома теплове навантаження у випарнику q_v , кДж/кг	Питома теплове навантаження у конденсаторі q_k , кДж/кг	Коефіцієнт перетворення ϕ
R407c	94,36	123,83	3,2
R134a	97,66	123,99	3,86
R290	181,94	231,15	3,67
R152a	193,19	238,33	4,39
R22	126,42	140,5	3,96
R401a	193,62	156,68	4,18

При розрахунку показників ефективності парокомпресійного циклу, найбільш ефективним фреоном для ТНСТ є R152a, у якого найбільші коефіцієнти перетворення та холодопродуктивності.

Температура фреонів в тепловому насосі вища, ніж в холодильних установках, тому фреон в тепловому насосі може розкладатися і викликати корозію устаткування. При використанні екологічно безпечних фреонів необхідно враховувати деякі недоліки, зокрема, вартість таких фреонів, високий робочий тиск, вміст кількох компонентів.

Для визначення ексергетичної ефективності парокомпресійного циклу необхідно провести ексергетичний аналіз, який заснований на термодинамічній функції і враховує властивості системи й навколишнього середовища, що дає можливість оцінити термодинамічну досконалість ТНСТ і визначити ефективність роботи установки [7].

Проводимо ексергетичний аналіз показників ефективності ТНСТ при використанні фреона R152a:

Ексергія віддана низькопотенційним теплоносієм у випарнику, кДж/кг:

$$e_v = \tau_v q_v,$$

де τ_v , — ексергетична температура низькопотенційного теплоносія.

Ексергія отримана високопотенційним джерелом у конденсаторі, кДж/кг:

$$e_k = \tau_k q_k,$$

де τ_k — ексергетична температура високопотенційного теплоносія.

Ексергія електроенергії, що витрачається на привід компресора, кДж/кг:

$$e_e = \frac{l_{ст}}{\eta_{e.м.} \eta_e}.$$

Ексергетичний ККД ТНСТ визначається за сумарною ексергією вхідних та вихідних потоків

$$\eta_e = \frac{e_{вих}}{e_{вх}} = \frac{e_k}{e_v + e_{ел}}.$$

Результати ексергетичного аналізу парокомпресійного циклу ТНСТ з фреоном R152a в залежності від температури навколишнього середовища зводимо до порівняльної таблиці (табл. 2).

Таблиця 2

Ексергетичний аналіз парокомпресійного циклу ТНСТ

Температура навк. серед. t_H , °C	Ексергія e_v , кДж/кг	Ексергія e_k , кДж/кг	Ексергетичний ККД η_e
10	10,49	43,49	0,55
5	13,67	47,23	0,57
0	16,86	50,74	0,59
-5	19,86	54,01	0,61
-10	23,04	57,28	0,62

Отже при розрахунку парокомпресійного циклу ТНСТ найбільш ефективним робочим тілом для ТНСТ є фреон R152a, в якого найбільший коефіцієнт перетворення та холодопродуктивності.

Застосування ТНСТ в системі оборотного циркуляційного водозабезпечення дасть змогу не лише ефективно виробляти теплову енергію, а й зменшити навантаження навколишнього середовища, що є актуальним для нинішнього стану довкілля в Україні та світі.

Література

1. Рей, Д. Тепловые насосы / Д. Рей, Д. Макмайкл. — М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
2. Денисова, А.Е. Комплексная альтернативная система теплоснабжения на основе низкопотенциальных источников тепла ТЭС и АЭС / А.Е. Денисова, В.А. Дубковский, С.Ю. Денисов // Радиацион. и ядер. безопасность. 2000. — Т. 3, вып. 4 — С. 100 — 103.
3. Мірошніченко, С.Т. Можливість застосування теплонасосних технологій на АЕС / С.Т. Мірошніченко, І.Ю. Софійський // Севастоп. нац. ун-т ядер. енергет. та промисл. С. 58 — 62.
4. Трубаев, П. А. Тепловые насосы: учеб. пособие / П.А. Трубаев, Б.М. Гришко. — Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. — 142 с.
5. Хайнрих, Г. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения / Г. Хайнрих, Х. Найорк, В. Нестлер: Пер. с нем. — М.: Стройиздат, 1985. — 351 с.
6. О рациональном использовании теплонасосных технологий в экономике Украины / Ю.М. Матсевич, Н.Б. Чиркин, Л.С. Богданович, и др. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. — № 3. — 2007. — С. 20 — 32.
7. Денисова, А.Е. Особенности работы теплового насоса в комплексной альтернативной системе теплоснабжения / А.Е. Денисова // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2001. — № 1. — С. 6 — 8.

References

1. Rey, D. Teplovye nasosy [Heat Pumps] / D. Rey, D. Makmaykl. Moscow, 1982. — 224p.
1. Denisova, A.E. Kompleksnaya alternativnaya sistema teplosnabzheniya na osnove nizkopotentsial'nykh istochnikov tepla TES i AES [Complex Alternative Heating System, Based on Low-Grade Heat Sources of TPP and NPP] / A.E. Denisova, V.A. Dubkovskiy, S.Yu. Denisov // Radiatsion. i yadern. bezopasnost' [Radiation and Nuclear Security] 2000. Vol. 3, Issue 4 — pp. 100 — 103.
2. Miroshnychenko, S.T. Mozhlyvist zastosuvannya teplonasosnykh tekhnolohii na AES [Possibility of Using Heat Pump Technologies at NPPs] / S.T. Miroshnychenko, I.Yu. Sofiiskiy // Sevastop. nats. un-t yader. enerhet. ta promysl. [Sevastop. national university of nucl. energ. and industry] pp. 58 — 62.
3. Trubaev P.A. Teplovye nasosy: ucheb. nasosy [Heat Pumps: a manual] / P.A. Trubaev, B.M. Grishko. — Belgorod, 2009. — 142 p.
4. Khaynrikh, G. Teplonasosnye ustanovki dlya otopleniya i goryachego vodosnabzheniya [Heat Pumps for Heating and Hot Water Supply] / G. Khaynrikh, Kh. Nayork, V. Nestler: transl. from German. — Moscow, 1985. — 351 p.
5. O ratsional'nom ispol'zovanii teplonasosnykh tekhnologiy v ekonomike Ukrainy [On the Rational Use of Heat Pump Technology in the Economy of Ukraine] / Yu.M. Matsevityy, N.B. Chirkin, L.S. Bogdanovich and others // Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit [Energy Saving. Energetics. Energy Audit] — #3. — 2007. — pp. 20 — 32.
6. Denisova, A.E. Osobennosti raboty teplovogo nasosa v kompleksnoy al'ternativnoy sisteme teplosnabzheniya [Features of Heat Pump Operation in Integrated Alternative Heating System] / A.E. Denisova // Ekotekhnologii i resursoberezhenie [Ecotechnologies and Resources]. — 2001. — #1. — pp. 6 — 8.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Корольов О.В.

Надійшла до редакції 18 січня 2012 г.