

**А. Є ДЕНИСОВА, О. С. ЖАЙВОРОН**

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ВОДИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

В роботі виконано аналітичні дослідження ефективності роботи теплових насосів у теплових схемах теплових та атомних електростанцій для систем централізованого опалення та гарячого водозабезпечення з урахуванням кліматичних умов України, що відповідає завданням енергозбереження і дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище. Основна увага приділяється підвищенню ефективності теплонасосної системи енергопостачання, до якої інтегрується альтернативне джерело енергії. Виконано аналіз ексергетичних параметрів циклів теплових насосів, що дозволив встановити, що найбільш ефективним робочим тілом циклу є фреон R152a, при якому досягається найбільший коефіцієнт перетворення теплового насоса, і найменший показник потужності компресора. Запропоновано шляхи та методи, що призводять до зменшення коефіцієнта недовиробітку електроенергії турбоустановкою та збільшення коефіцієнта корисної дії паротурбінного циклу. Показано, що ефективність системи найбільше впливають втрати у випарнику, тому ефективності цього елемента теплового насоса необхідно приділяти найбільшу увагу при використанні енергії циркуляційної води. Додатковий аспект новизни запропонованого методу полягає у можливості подальшої оптимізації техніко-економічних параметрів енергосистеми. Запропоновано методологію, яка базується на використанні ексергетичного методу аналізу для обґрунтування умов раціонального використання теплових насосів для електростанцій при утилізації низькопотенційної теплоти циркуляційної води охолодження конденсаторів турбін, що можна вважати інноваційним підходом до аналізу перспектив розвитку теплонасосного теплопостачання.

**Ключові слова:** ефективність, електростанція, тепловий насос, циркуляційна вода, ексергетичний метод.

**Вступ.** Україна є країною, яка недостатньо забезпечена традиційними видами первинної енергії, що змушує країну вдаватися до їх імпорту. Екологічний стан довкілля та постійне зростання цін на енергоносії, які імпортуються, зумовлює впровадження альтернативних енерготехнологій в енергетичному, житлово-комунальному та промисловому секторах економіки.

Частка споживання газу в паливно-енергетичному комплексі України залишається надмірною у зрівнянні з розвинутими державами світу. З урахуванням енергетичної кризи актуальним питанням є впровадження інноваційних технологій генерації і споживання енергії. Одним із напрямків рішення вказаної проблеми, спрямованої на енергозбереження, є застосування теплонасосних технологій на енергетичних та промислових підприємствах для генерації енергії з використанням вторинних низькопотенційних джерел технологічних процесів [1].

У ряді країн використання теплових насосів передбачене законодавством, наприклад в США, згідно з федеральним законодавством для нових громадських будівель використовуються тільки теплові насоси. А у ряді країн світу і ЄС передбачена дотація на установку теплових насосів (ТН), які зменшують теплове забруднення довкілля [2].

На відміну від більшості розвинених держав світу, Україна відстає у впровадженні інноваційних технологій, що, в свою чергу, негативно впливає на її енергетичну безпеку. Отже, створення інноваційних систем енергозабезпечення, які працюють за рахунок раціонального використання альтернативних паливно-енергетичних ресурсів є важливим завданням.

**Аналіз стану питання.** До теперішнього часу для теплових і атомних електростанцій досвід

впровадження теплонасосних технологій в технологічних схемах генерації електроенергії та теплоти є недостатнім [3]. Деякі пропозиції носять декларативний характер і не дозволяють визначити доцільність впровадження теплонасосних технологій в теплових схемах електростанцій, термодинамічну ефективність паросилового циклу електростанцій, а також ефективність систем централізованого кондиціювання та теплопостачання [4].

Ситуація, яка склалась, вимагає розробки методики аналізу ефективності процесів в елементах теплових схемах електростанцій із застосуванням теплонасосних технологій, що дасть змогу оцінити ефективність запропонованих схем та обрати раціональний шлях її реалізації з використанням ексергетичного методу аналізу [5].

Найбільш перспективним напрямком застосування теплонасосних технологій на електростанціях є утилізація низькопотенційної теплоти циркуляційної води охолодження конденсаторів турбін. Температура циркуляційної води після конденсаторів коливається в діапазоні 20...30 °С в залежності від пори року, що є високоефективним джерелом теплоти для теплонасосних систем, адже при застосуванні пароконденсаторного циклу ТН можна отримати теплоносії з температурою 60...80 °С [6]. Отримання таких параметрів дає можливість використовувати ТН для потреб централізованого теплопостачання, не використовуючи при цьому відбори пари з турбоустановки. Це надасть можливість зменшити коефіцієнт недовироблення електроенергії турбоустановкою, а також збільшити ККД паротурбінного циклу [7].

© Денисова А.Є, Жайворон О.С. 2023

Для таких теплонасосних систем теплозабезпечення необхідно визначити раціональні показники їх роботи, щоб обґрунтувати економічну доцільність витрати електроенергії на привід компресора теплового насосу. При цьому, слід враховувати також ряд впливових чинників, зокрема екологічну, економічну та енергетичну ефективність.

**Мета.** Розробка математичної моделі для визначення раціональних режимів роботи теплонасосних установок для утилізації циркуляційної води енергоблоків.

**Метод дослідження.** Перспективним шляхом підвищення ефективності процесів в теплових схемах електростанцій із застосуванням теплонасосних технологій є використання ексергетичного методу аналізу, що дозволяє обґрунтовано підходити до вибору раціональних теплових схем [7].

Слід зауважити, що при роботі теплофікаційних відборів паротурбінної установки для потреб системи теплопостачання відбувається суттєве зниження вироблення електричної енергії турбогенераторами [8]. Статистичні показники втрати електричної потужності взимку, при температурі навколишнього середовища мінус 21 °С, наприклад, енергоблоками Рівненської атомної електростанції, де використовується оборотна система циркуляційного водозабезпечення для охолодження конденсаторів парових турбоустановок, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Втрата електричної потужності при роботі теплофікаційних відборів на електростанції

Номер енергоблоку	$N_{вст}, \text{МВт}$	$N_{ном}, \text{МВт}$	$N_{тф}, \text{МВт}$
1	440	420	12,3
2	440	415	7,6
3	1000	945	10,2
4	1000	993	15,9

Таким чином, застосування теплонасосних технологій на електростанціях шляхом утилізації низькопотенційної теплоти циркуляційної води охолодження конденсаторів турбін, є перспективним напрямком. Температура циркуляційної води після конденсаторів парових турбін на українських атомних станціях коливається у межах 23...32 °С в залежності від пори року, що є високоєфективним джерелом теплоти для теплонасосних систем теплопостачання [9]. Середньостатистичні річні показники температури циркуляційної води оборотної системи після основних конденсаторів паротурбінної установки наведено на рис. 1.

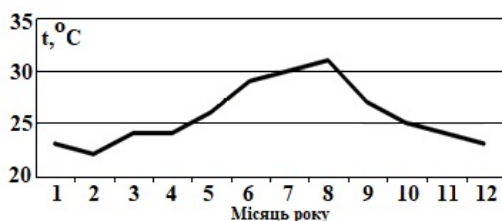


Рис. 1. Температура циркуляційної води після конденсаторів протягом року

Крім того, на атомних електростанціях існують технологічні потреби в теплопостачанні внутрішніх об'єктів, а саме, безпосередньо використання теплоти в теплових схемах, наприклад, для хімоводоочистки додаткової води. Для цих потреб використовується відбори пари в колекторі власних потреб електростанції, зменшення яких при застосуванні теплонасосних систем призводить до підвищення техніко-економічних показників роботи енергоблоків.

Технічна вода після конденсаторів турбін електростанцій має досить стабільну температуру протягом року. Принципова схема теплонасосної системи, яка використовує низькопотенційну енергію скидних вод, представлена на рис. 2.

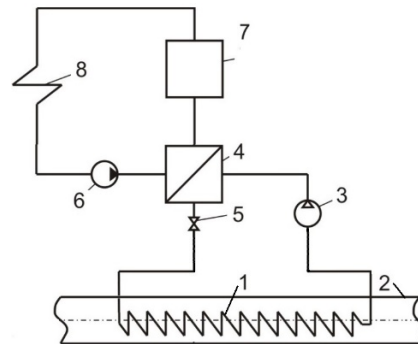


Рис. 2. Принципова схема теплового насоса на базі циркуляційної води

1 – випарник; 2 – технологічний канал; 3 – компресор; 4 – конденсатор; 5 – дросель; 6 – насос вторинного контуру циркуляції; 7 – дублер енергії; 8 – система опалення

Після випаровування робочого тіла циклу у випарнику 1 теплового насоса, що міститься в колекторі технологічного каналу 2 водозабезпечення, пара, що утворилася, надходить в компресор 3, де тиск робочого тіла значно підвищується. Далі пара потрапляє до теплообмінника 4, де відбувається відведення теплоти у вторинний контур циркуляції, робочим тілом якого є вода, з обов'язковим протіканням процесу конденсації пари робочого тіла циклу, після чого конденсат крізь дросель 5 повертається до випарника 1.

Вторинний контур циркуляції складається з насоса 6, який забезпечує циркуляцію води, резервного генератора теплоти 7 та системи опалення 8. При цьому, циркуляційна вода, яка відводиться від конденсаторів теплових і атомних електростанцій, нагрівається до 20...35 °С, та скидається в природні чи штучні водойми [9].

Якщо прийняти, що температура в випарнику ТН повинна бути на 5...15°C нижче, тоді цикл ТН, наприклад, для такого робочого тіла як аміак, представлений на рис. 3. Цикл теплового насоса побудовано для ізоентропійного ККД, що дорівнює 0,9 та ККД компресора  $\eta_k=0,92$  [10].

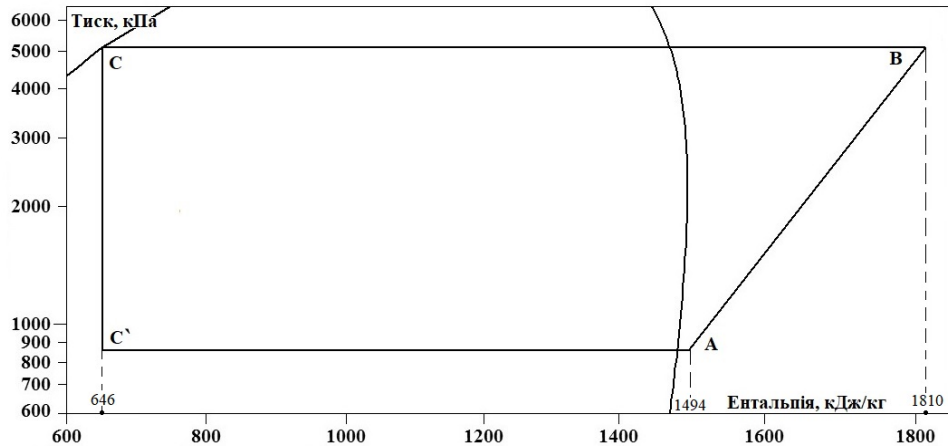


Рис. 3 Цикл теплового насоса з використанням теплоти скидних вод електростанції  
 А – початок процесу стискування; В – вихід з компресора; С – точка завершення конденсації робочого тіла

При температурі в конденсаторі 90 °С, коефіцієнт перетворення становить:

$$COP = COP' \cdot \eta_k = 3,68 \cdot 0,92 = 3,39,$$

де  $h_i$  – ентальпія в  $i$ -тій точці, кДж/(кг·К);

$$COP' = (h_b - h_c) / (h_b - h_A) = (1810 - 646) / (1810 - 494) = 3,68.$$

При виборі робочого тіла теплового насосу важливим є діапазон його робочих температур. При температурах вище за критичну точку фреон не використовується. Коефіцієнт перетворення теплоти  $COP$  теплового насосу визначається властивостями фреону. Чим вище необхідні температури кипіння і випаровування до критичної точки, тим коефіцієнт  $COP$  нижче, але чим температура далі від критичної точки, тим більше витрата холодильного агенту [11].

Основними країнами, що виробляють фреони, було ухвалено Монреальський протокол, який

розділив фреони на такі групи: I – особливо озононебезпечні (R11, R12, R13, R13B1); II – озон (R21, R22); III – екологічно безпечні фреони (R134, R134a, R152a, R143a, R125, R32, R23, R218, R116, RC318, R290, R600, R600a, R717). За показниками холодопродуктивності (ХПр) парокомпресійних циклів теплового насоса найбільші перспективи має використання фреону R152a, який має найбільший коефіцієнт перетворення та ХПр, і водночас найменший показник потужності компресора. Для визначення характеристик фреонів для можна використати програму розрахунку парокомпресійних циклів теплового насосу CoolPack. Наприклад, при температурах: випаровування  $T_1=20$  °С і конденсації  $T_2=75$  °С, що відповідає умовам у холодний період для систем опалення та теплопостачання (рис. 4, 5).

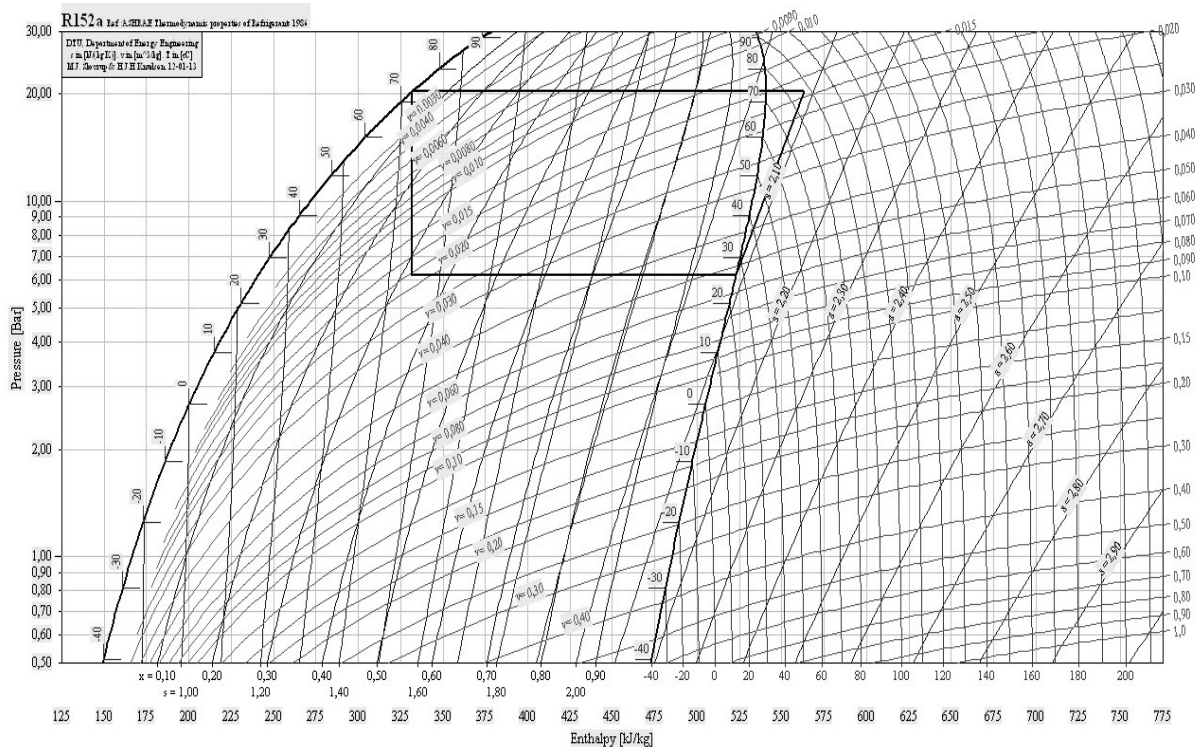


Рис. 4 Парокомпресійний цикл теплового насоса з фреоном R152a

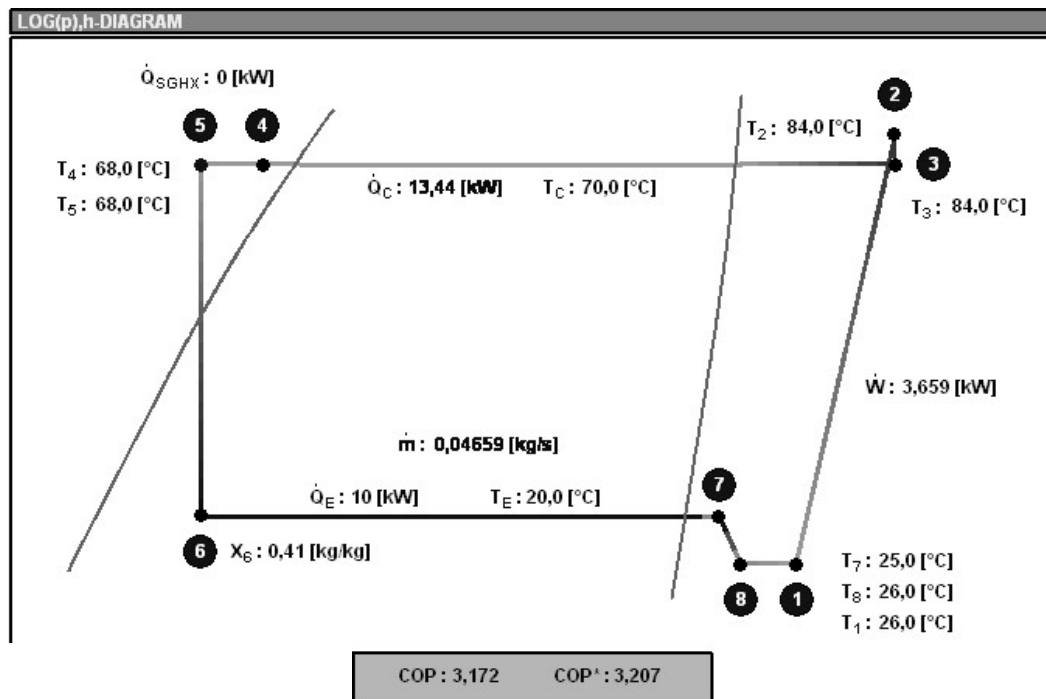


Рис. 5 Результати розрахунку циклу теплового насоса з фреоном R290 в середовищі CoolPack

З урахуванням того, що виробництво теплоти має бути економічно ефективним та екологічно безпечним для довкілля доцільно використовувати екологічно безпечні фреони. При виборі найбільш ефективного фреону для теплового насоса слід враховувати ряд факторів: екологічну, економічну та енергетичну ефективність.

**Результати досліджень.** Результати розрахунку парокомпресійних циклів теплового насоса, які одержані в середовищі CoolPack для різних типів фреонів, зведені в таблицю 4.

Таблиця 4. Характеристики парокомпресійних циклів теплового насоса з екологічно безпечними фреонами.

Тип фреону	COP	Потужність компресора W
R134a	3,33	4,13
R152a	3,81	4,12
R1270	3,16	3,32
R290	3,17	3,43

Як видно з розрахунків парокомпресійних циклів теплового насоса з екологічно безпечними фреонами, найбільш ефективним фреоном є R152a, в якого найбільш оптимальні співвідношення коефіцієнту перетворення та показників потужності компресора. 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. Це означає, що всі деталі холодильного контуру повинні мати високу міцність, а отже і вартість [10].

Для оптимальних режимів роботи теплового насоса необхідно провести аналіз різних варіантів

температурних перепадів в теплообмінниках при різних температурах навколишнього середовища. Для розрахунку показників ефективності парокомпресійних циклів вибираємо температуру випаровування  $t_b=20...30$  оС, що відповідає температурі циркуляційної води протягом року.

В роботі [11] виконаний термодинамічний аналіз традиційних та теплонасосних систем тепlopостачання, які забезпечують (рис. 6):

- виробіток електроенергії і прямий електричний обігрів (схема а);
- виробіток електроенергії і відпуск теплоти гострою парою (схема б);
- ТЕЦ (схема в);
- сумісний виробіток електроенергії і теплоти (схема з);
- виробіток електроенергії і тепlopостачання за допомогою ТН (схема д);
- сумісний виробіток електроенергії і тепlopостачання від ТН (схема е).

При зіставленні різних систем тепlopостачання поряд з термoeкономічними показниками слід враховувати соціально-економічні фактори. Результати досліджень показують, що енергетичне зіставлення дозволяє визначити перевагу одного варіанта над іншим, за умов, коли використовується одне і теж джерело первинної енергії [12].

В інших випадках вираш не завжди відповідає вирашу в витратах на різні джерела через різну вартість первинної енергії. Тому при зіставленні варіантів важливим є врахування принципів термoeкономіки.

Термодинамічні схеми комбінованого виробництва теплоти і електроенергії доцільно порівнювати по витраті високопотенційної теплоти (ВПТ)  $Q_1$ , що є первинною енергією, для генерації

певної кількості електроенергії  $W$  і теплоти середнього потенціалу  $Q$ . У відповідності до такої постановки задачі в схемах з розділним виробітком теплоти і електроенергії, витрати високопотенційної теплоти  $Q_1$  визначаються як сума:

$$Q_1 = Q/\eta_Q + W/\eta_W,$$

де  $\eta_Q$  і  $\eta_W$  – ККД при генерації теплоти і електроенергії, відповідно.

Витрати  $Q_1$  для кожної з термодинамічних схем комбінованого виробництва теплоти і електроенергії (рис. 6), які визначаються за формулами, що містяться в табл. 5, дозволяють визначити режими раціонального використання теплонасосного теплопостачання.

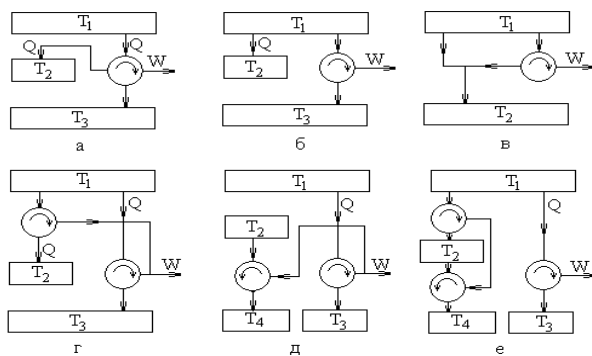


Рис. 6. Схеми комбінованого виробництва теплоти і електроенергії

Термодинамічний аналіз показує, що схема з ТН (рис. 6, б) по витраті високопотенційної теплоти  $Q_1$  виявляється більш економічною ніж прямий електричний обігрів (рис. 6 а). Проте, з підвищенням температури  $T_2$  нижнього джерела вираш від застосування ТН зменшується.

Таблиця 5. Витрати ВПТ  $Q_1$  в різних схемах комбінованого енергопостачання

Схема	Витрати високопотенційної теплоти	Примітка
А	$Q_1 = Q/\eta_t^k + W/\eta_t^k$	–
Б	$Q_1 = Q + W/\eta_t^k$	–
В	$Q_1 = Q + W$	$Q \geq W(l - \eta_t^t)/\eta_t^t$
Г	$Q_1 = Q(\eta_t^t - \eta_t^k) / [\eta_t^k(1 - \eta_t^t)] + W/\eta_t^k$	$Q \leq W(l - \eta_t^t)/\eta_t^t$
Д	$Q_1 = Q/(\eta_t^k \cdot \varphi) + W/\eta_t^k$	–
Е	$Q_1 = Q/[1 + \eta_t^k(\varphi - 1)] + W/\eta_t^k$	$Q \geq W(l - \eta_t^t)/\eta_t^t$

В таблиці:  $\eta_t^k$  – термічний ККД конденсаційного циклу;  $\eta_t^t$  – термічний ККД теплового” циклу;  $\varphi$  – коефіцієнт перетворення СОР теплового насосу

При зіставленні теплонасосного теплопостачання з ТЕЦ (рис. 6, е) виявляється, що економія високопотенційної теплоти, що віднесена до 1 кДж виробленої теплоти, буде змінюватись в залежності від співвідношення між тепловим  $Q$  і електричним навантаженням  $W$ .

Для схеми ТЕЦ (рис. 6, в) і схеми сумісного виробітку електроенергії і теплопостачання від ТН

(рис. 6, е) величина співвідношення між тепловим і електричним навантаженням буде у межах  $\infty > Q/W \geq T_2/(T_1 - T_2)$ .

Для випадку сумісного виробітку електроенергії і теплоти (рис. 6, г) справедливим є співвідношення  $T_2/(T_1 - T_2) \geq Q/W > \infty$ .

У випадку  $Q/W > T_2/(T_1 - T_2)$  схему сумісного виробітку електроенергії і теплоти (рис. 1.4, г) слід виключити з розгляду як малоефективну.

При  $Q/W < T_2/(T_1 - T_2)$  слід виключити з розгляду схему ТЕЦ (рис. 1.4, в) та схему сумісного виробітку електроенергії і теплопостачання від ТН (рис. 1.4, е) як малоефективні.

У випадку  $Q/W = T_2/(T_1 - T_2)$  тотожними виявляються схема ТЕЦ (рис. 6, в), схема сумісного виробітку електроенергії і теплоти (рис. 6, г) та схема сумісного виробітку електроенергії і теплопостачання від ТН (рис. 6, е). Отже, будь-яка з вказаних схем може бути використана ефективно.

Таким чином, термодинамічний аналіз дозволяє у першому наближенні визначити економічну доцільність того чи іншого можливого варіанту теплопостачання.

**Термодинамічний аналіз роботи ТН** Для обґрунтування схемних рішень щодо теплонасосної системи та раціональних режимів її роботи необхідно провести аналіз різних варіантів температурних перепадів в теплообмінниках при різних температурах довкілля [9].

Для розрахунку показників ефективності парокомпресійних циклів вибираємо температуру випаровування  $t_b = 20 \dots 30$  °С, що відповідає температурі циркуляційної води електростанції протягом року та температуру конденсації  $t_k = 75$ °С для систем теплопостачання. Тоді:

Робота стиснення в компресорі, кДж/кг:

$$l_{ст} = h_2 - h_1$$

де  $h_1$  та  $h_2$  – ентальпія робочого тіла на вході та на виході з компресора, кДж/кг

Рівняння теплового балансу ТН циклу, кДж/кг:

$$q_b + l_{ст} = q_k$$

де  $q_b$  – енергія, що отримана при випаровуванні у випарнику ТНСТ, кДж/кг;

$l_{ст}$  – робота стиснення в компресорі,

$q_k$  – енергія, що отримана при конденсації в конденсаторі ТНСТ, кДж/кг.

Теплове навантаження ТН, кДж/кг:

$$q_{тн} = q_k$$

де  $q_k$  – енергія, що отримана при конденсації робочого тіла в конденсаторі ТН, кДж/кг.

Питома енергія, що споживається електродвигуном компресора ТН, кДж/кг:

$$W = l_{ст}/\eta_{ем} \eta_e$$

де  $\eta_{em}$  – ККД електромеханічний;  
 $\eta_e$  – ККД електричний.

Енергетична ефективність циклу ТН або коефіцієнт перетворення COP:  $COP = q_k/l_{ст}$ . Аналіз ефективності парокомпресійного циклу ТН для робочого тіла R152a для різної температури циркуляційної води  $t_{HI}$ , дозволяє зробити висновок, що оптимальні умови роботи досягаються при температурі 30 °C (табл. 6).

Таблиця 6. Показники ефективності ТН при зміні температури циркуляційної води.

$t_{HI}$ , °C	$q_v$ , кДж/кг	$q_k$ , кДж/кг	Коефіцієнт перетворення ТН COP
20	187,36	233,83	4,03
22	188,66	232,99	4,26
24	189,94	232,15	4,50
26	191,19	231,33	4,76
28	192,42	230,5	5,05
30	193,62	229,68	5,37

Аналіз результатів розрахунків ефективності парокомпресійного циклу ТН дозволяє зробити висновок, що робота теплового насосу при підвищенні температури циркуляційної води є найбільш ефективною.

**Ексергетичний аналіз ефективності роботи ТН** Ексергетичний метод аналізу є найбільш точним, бо враховує властивості системи та навколишнього середовища, що дає можливість оцінити термодинамічну досконалість циклу ТН та визначити ефективність роботи установок.

Зв'язки, які встановлюються при ексергетичному аналізі між термодинамічними характеристиками та техніко-економічними показниками системи, дозволяють оцінити ефективність її роботи, а також визначити шляхи та засоби вдосконалення цієї системи. Ексергія виявляє граничні можливості перетворення енергії при ідеальних процесах, а ексергетичні витрати характеризують ступінь відхилення реальних процесів від теоретично досяжних.

Об'єктивність результатів, отриманих за допомогою ексергетичного аналізу, обумовлена насамперед тим, що вони засновані на розрахунку мінімально необхідних матеріальних та енергетичних затрат на реалізацію технологічного процесу, який аналізується. В більшості інших методів використовують порівняння, наприклад, зміну ентропії системи, по відношенню до якої оцінюються показники досліджуваного об'єкту. Такий спосіб не є об'єктивним, оскільки результати цього аналізу залежать від того, наскільки вдало обрано операції порівнювання.

Ексергетичний аналіз дозволяє досліднику уникнути необхідності підбору вказаних операцій для діючих установок, а для нових (або тих, що знаходяться в стадії проектування) дозволяє одразу виявити можливість їх впровадження у виробництво шляхом зрівняння мінімально необхідних витрат з ресурсами, що є в наявності [15].

Аналіз ефективності установки на основі ексергетичних витрат використовують у все більших областях промисловості та особливо в наукових дослідженнях завдяки його об'єктивності. Аналіз можна провести двома шляхами: методом ексергетичних потоків та методом віднімання ексергетичних витрат (ентропійний метод).

Метод ексергетичних потоків фіксує величини всіх потоків ексергії, в тому ж числі і ті, що замикаються самі на себе, та враховує як зростання, так і зменшення потоків ексергії в робочих процесах енергетичних установок.

Метод віднімання ексергетичних витрат не враховує всі потоки ексергії та використовує тільки ексергетичні витрати. Отримані витрати підсумовуються між собою та дозволяють підрахувати продукцію будь якої енергетичної установки як різницю між первинну ексергією та витратами ексергії. Вони також дозволяють підрахувати енерговитрати в холодильних та теплонасосних установках як суму первинної енергії та енергетичних витрат [16].

При проведенні розрахунків ексергетичної ефективності потрібно визначити температуру  $T_0$ , відносно якої будуть проводитись розрахунки. Звичайно  $T_0$  – це температура довкілля, яка є зручною для виконання, бо вона є найменшою для більшості енергетичних комплексів, що аналізуються. Зв'язки, які встановлюються при ексергетичному аналізі між термодинамічними характеристиками і техніко-економічними показниками системи, дають можливість оцінити не тільки ефективність її роботи, а й встановити шляхи і методи її вдосконалення. Достовірність одержуваних при такому аналізі результатів обумовлена тим, що вони базуються на розрахунку мінімально необхідних матеріальних і енергетичних витрат на реалізацію технологічних процесів. В основі ексергетичного аналізу лежить поняття ексергії. Розрізняють два види ексергії: ексергія таких форм енергії як механічні, електричні, електромагнітні тощо, які не визначаються ентропією, та ексергія потоків речовини і енергії (внутрішня енергія потоків речовини, енергія хімічних зв'язків, теплового потоку), які характеризуються ентропією.

Виконаємо ексергетичний аналіз показників ефективності ТН:

Ексергія  $e_v$ , яка відведена низькопотенційним теплоносієм у випарнику ТН, кДж/кг:

$$e_v = T_B q_v$$

де  $T_B = \frac{T_{ср.н} - (t_0 + 273)}{T_{ср.н}}$  – ексергетична температура низькопотенційного теплоносія (змінюється в діапазоні 0...1);

Середньоарифметична температура низькопотенційного теплоносія, К:

$$T_{ср.н} = \frac{t_{н1} - t_{н2}}{\ln \frac{t_{н1} + 273}{t_{н2} + 273}}$$

Ексергія  $e_k$ , яка отримана у конденсаторі, кДж/кг:

$$e_k = \tau_k q_k:$$

де  $\tau_k = \frac{T_{ср.в} - (t_0 + 273)}{T_{ср.в}}$  – ексергетична температура високопотенційного теплоносія.

Середньологарифмічна температура гарячого теплоносія, К:

$$T_{ср.в} = \frac{t_{в2} - t_{в1}}{\ln \frac{t_{в2} + 273}{t_{в1} + 273}}$$

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

$$e_e = \frac{l_{ср}}{\eta_{ел} \eta_e}$$

Ексергетичний ККД  $\eta_e$  теплового насоса визначається по сумарній ексергії вхідних та вихідних потоків:

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

Результати розрахунків за ексергетичним методом аналізу парокомпресійного циклу ТНСТ в залежності від температури довкілля наведено в табл. 7.

Таблиця 7 Результати розрахунків ТН

Температура довкілля $t_H$ , °С	$e_v$ , кДж/кг	$e_k$ , кДж/кг	$\eta_e$
10	10,49	43,49	0,55

### Список литературы

- Doroshenko A.V. Development and Ecological-Energy Comparative Analysis of Traditional (Vapor Compression) Solutions and Alternative (Solar Absorption) Solutions of Air Conditioning Systems / A.V. Doroshenko, A.R. Antonova, L.V. Ivanova // Problemele energeticii regionale termoenergetica. 2017.– №3 (35)– pp. 69- 83.
- Herrmann, J. “Optimierung der städtischen Energieversorgung am Beispiel der Stadt Augsburg unter besonderer Berücksichtigung von Wärmetransportmechanismen”. PhD thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Augsburg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching. 2012.
- Deshko V.I., Karpenko D.S. Analysis of aspects and simulation modeling of the thermal energy market in Ukraine // Management of technological processes in energy technologies under the general editorship of Anatoliy M. Pavelko, Kielce, Politechnika Swietokrzyska, 2019, pp. 7-4.
- Мацевитый Ю. М., Чиркин Н. Б., Богданович Л. С., Клепанда А. С. О рациональном использовании теплонасосных технологий в экономике Украины // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит; № 3, 2007. – С.20 – 32
- Jin Hou, Peng Xu, Xing Lu, Zhihong Pang, Yiyi Chu and Gongsheng Huang. Implementation of expansion planning in existing district energy system: A case study in China// Applied Energy, 2018, N 211, PP. 269-281.
- Veremiichuk Y., Zamulko A. The use of energy storage to control the electrical load of the power system Ukraine // Proceedings of V International Scientific-Technical Conference “Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering”. Kielce University of Technology. Kielce: Poland. 2021. pp. 85–87. ISBN 978-83-66678-08-8.
- Yunus Emre Yuksel. Energy and exergy analysis of renewable energy sources-based integrated system for multi-generation application. /Yunus Emre Yuksel, Murat Ozturk. // Int. J. of Exergy 2017 – Vol. 22, N.3, pp. 250– 278.
- Arsham Mortazavi. Conventional and advanced exergy analysis of solar flat plate air collectors /Arsham Mortazavi, Mehran Ameri // Energy, Vol. 142, 2018, pp. 277– 288.
- Mingjiang Ni. Thermodynamic analysis of a gas turbine cycle combined with fuel reforming for solar

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

### Висновки та перспективи подальшого розвитку.

Впровадження ТН систем тепlopостачання на електростанціях для кліматичних умов України відповідає задачам енергозбереження, дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин в довкілля, зокрема парникових газів, у порівнянні із звичайними видами тепlopостачання, що зменшує теплове забруднення навколишнього середовища при роботі електростанцій, що є актуальним для України і світу.

Використання теплових насосів в теплових схемах теплових і атомних електростанцій для потреб систем централізованого опалення та гарячого водозабезпечення дозволяє зменшити коефіцієнт недовироблення електроенергії турбоустановкою, а також збільшити ККД паротурбінного циклу.

Як видно з енергетичного та ексергетичного розрахунків парокомпресійних циклів ТН найбільш ефективним робочим тілом циклу є фреон R152a, при якому досягається найбільший коефіцієнт перетворення COP, та найменший показник потужності компресора.

Використання ексергетичного методу дозволяє оцінити ефективність роботи установки при заданих параметрах. Видно, що на ефективність ТН системи найбільше впливають витрати у випарнику, тому саме йому потрібно приділяти найбільшу увагу при проектуванні ТН з використанням енергії циркуляційної води.

- thermal power generation./ Mingjiang Ni, Tianfeng Yang, Gang Xiao, Dong Ni, Kefa Cen. // *Energy*, Vol. 137, 2017, PP. 20–30.
10. Denysova A.E. Modelling the efficiency of power system with reserve capacity from variable renewable sources of energy / A. E. Denysova, V.R. Nikulshin, V.V. Wysochin, P.S.Zhaivoron,
  11. Y.V. Solomentseva // *Herald of advanced Information Technology*, 2021, Vol.4. No 4, pp.318-328.
  12. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов / Т. В. Морозюк. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.
  13. ІМорозюк Т.В. Водоаммиачные термотрансформаторы (теория, анализ, синтез, оптимизация): дис. ... докт. техн. наук: 05.14.05 / Татьяна Владиленовна Морозюк. – Одесса, ОНТУ, 2001. – 298 с.
  5. Jin Hou, Peng Xu, Xing Lu, Zhihong Pang, Yiyi Chu and Gongsheng Huang. Implementation of expansion planning in existing district energy system: A case study in China// *Applied Energy*, 2018, N 211, PP. 269-281.
  6. Veremiichuk Y., Zamulko A. The use of energy storage to control the electrical load of the power system Ukraine // *Proceedings of V International Scientific-Technical Conference “Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering”*. Kielce University of Technology. Kielce: Poland. 2021. pp. 85–87. ISBN 978-83-66678-08-8.
  7. Yunus Emre Yuksel. Energy and exergy analysis of renewable energy sources-based integrated system for multi-generation application. /Yunus Emre Yuksel, Murat Ozturk. // *Int. J. of Exergy* 2017 – Vol. 22, N.3, pp. 250–278.
  8. H.Z. Hassan. Thermodynamic analysis and theoretical study of a continuous operation solar-powered adsorption refrigeration system. / H.Z. Hassan, A.A. Mohamad. // *Energy*, Vol. 61, 2013, PP. 167–178.
  9. Arsham Mortazavi. Conventional and advanced exergy analysis of solar flat plate air collectors /Arsham Mortazavi, Mehran Ameri // *Energy*, Vol. 142, 2018, pp. 277–288.
  10. Mingjiang Ni. Thermodynamic analysis of a gas turbine cycle combined with fuel reforming for solar thermal power generation./ Mingjiang Ni, Tianfeng Yang, Gang Xiao, Dong Ni, Kefa Cen. // *Energy*, Vol. 137, 2017, PP. 20–30.
  11. Denysova A.E. Modelling the efficiency of power system with reserve capacity from variable renewable sources of energy / A. E. Denysova, V.R. Nikulshin, V.V. Wysochin, P.S.Zhaivoron, Y.V. Solomentseva // *Herald of advanced Information Technology*, 2021, Vol.4. No 4, pp.318-328.
  12. Morozjuk, T. V. Teorija holodil'nyh mashin i teplovyh nasosov. Odessa: Studija «Negociant», 2006. Print.
  13. Morozjuk, T. V. Vodoammiachnye termotransformatory (teorija, analiz, sintez, optimizacija). Dis. ... d-ra. tehn. Nauk. Odessa: ONTU, 2001. Print.

### References (transliterated)

1. Doroshenko A.V. Development and Ecological-Energy Comparative Analysis of Traditional (Vapor Compression) Solutions and Alternative (Solar Absorption) Solutions of Air Conditioning Systems / A.V. Doroshenko, A.R. Antonova, L.V. Ivanova // *Problemele energeticii regionale termoenergetica*. 2017.– №3 (35)– pp. 69- 83. ().
2. Herrmann, J. “Optimierung der städtischen Energieversorgung am Beispiel der Stadt Augsburg unter besonderer Berücksichtigung von Wärmetransportmechanismen”. PhD thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Augsburg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, 2012.
3. Deshko V.I., Karpenko D.S. Analysis of aspects and simulation modeling of the thermal energy market in Ukraine // *Management of technological processes in energy technologies under the general editorship of Anatoliy M. Pavelko*, Kielce, Politechnika Swietokrzyska, 2019, pp. 7-4.
4. Matsevity Y.M., Chirkin N.B. Bogdanovich L.S. Klepanda A.C. O ratsional'nom ispolzovanii teplonasosnykh tekhnologiy v ekonomike Ukrainy // *Energosberegienie. Energetyka. Energoaudit*, 2007, No 3.– pp. 20 – 32

*Надійшла (received) 19.05.2023*

### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Денисова Алла Євсївна (Денисова Алла Евсеевна, Denysova Alla Evsiiwna )** – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Одеська політехніка», директор Українсько-польського інституту; м. Одеса, Україна;  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3906-3960>;  
 e-mail: [alladenysova@gmail.com](mailto:alladenysova@gmail.com)

**Оксана Сергїївна Жайворон (Оксана Сергеевна Жайворон, Oksana Sergiivna Zhaivoron Zhaivoron** – аспірант кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики. Національний університет Одеська політехніка, м. Одеса, Україна,  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6750-2388>,  
 e-mail: [jaivoron.oksana@gmail.com](mailto:jaivoron.oksana@gmail.com)



*A. Є. ДЕНИСОВА, О. С. ЖАЙВОРОН*

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

В работе выполнены аналитические исследования эффективности работы тепловых насосов в тепловых схемах тепловых и атомных электростанций для систем централизованного отопления и горячего водообеспечения с учетом климатических условий Украины, что отвечает задачам энергосбережения и позволяет уменьшить выбросы вредных веществ в окружающую среду. Основное внимание уделяется повышению эффективности теплонасосной системы энергоснабжения, в которую интегрируется альтернативный источник энергии. Выполнен анализ эксергетических параметров циклов тепловых насосов, позволивший установить, что наиболее эффективным рабочим телом цикла является фреон R152a, при котором достигается наибольший коэффициент преобразования теплового насоса, и наименьший показатель мощности компрессора. Предложены пути и методы, которые приводят к уменьшению коэффициента недоработки электроэнергии турбоустановкой и увеличению коэффициента полезного действия паротурбинного цикла. Показано, что на эффективность системы наибольшее влияние оказывают потери в испарителе, поэтому эффективности этого элемента теплового насоса необходимо уделять наибольшее внимание при использовании энергии циркуляционной воды. Дополнительный аспект новизны предлагаемого метода заключается в возможности дальнейшей оптимизации технико-экономических параметров энергосистемы. Предложена методология, которая базируется на использовании эксергетического метода анализа для обоснования условий рационального использования тепловых насосов для электростанций при утилизации низкопотенциальной теплоты циркуляционной воды охлаждения конденсаторов турбин, что можно считать инновационным подходом к анализу перспектив развития теплонасосного теплоснабжения.

**Ключевые слова:** эксергетическая эффективность, электростанция, тепловой насос, циркуляционная вода.

*A. E. DENYSOVA, O. S. ZHAIIVORON*

### **INCREASING THE EFFICIENCY OF HEAT PUMP USING CIRCULATING WATER OF POWER PLANTS**

In the article analytical studies of the efficiency of heat pumps in the thermal schemes of thermal and nuclear power plants for centralized heating and hot water supply systems taking into account the climatic conditions of Ukraine have been carried out. This task meets the objectives of energy saving and reduces emissions of harmful substances into the environment. The main focus is on improving the efficiency of the heat pump power supply system, which integrates an alternative energy source. An analysis of the exergy parameters of heat pump cycles has been performed, which have made it possible to establish that the most efficient working fluid of the cycle is freon R152a, at which the highest heat pump conversion coefficient and the lowest compressor power indicator are achieved. Ways and methods leading to reduction to underproduction of the electricity by turbine of of power plant and to increasation of the efficiency of a steam turbine cycle are proposed. It is shown that the efficiency of the system is most affected by losses in the evaporator, so the efficiency of this element of the heat pump should be given the most attention when using the energy of circulating water. An additional aspect of the novelty of the proposed method lies in the possibility of further optimization of the technical and economic parameters of the power system. A methodology based on the use of the exergy method of analysis to substantiate the conditions for the rational use of heat pumps for power plants in the utilization of low-grade heat of circulating water for cooling the turbine condensers is proposed, which can be considered as innovative way. Results open the further prospects for the development of heat pump heat supplyhas been proposed.

**Key words:** exergy efficiency, power plant, heat pump, circulating water.