

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.82>

УДК 004.94:620.91

Ексергетична ефективність теплонасосних технологій для когенераційних потреб

Денисова Алла Євсївна¹⁾

Д-р техніч. наук, професор, директор Українсько-польського інституту

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3906-3960>; alladenysova@gmail.com. Scopus Author ID: 57193405766

Іванов Павло Олександрович¹⁾

Аспірант каф. Теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8897-0222>; 7873780@ukr.net

¹⁾ Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Запропоновано методику аналізу ексергетичної ефективності процесів в елементах когенераційних систем із використанням теплонасосних технологій, що дало змогу визначити ефективність рішень та обрати раціональний шлях їх практичної реалізації. В роботі основна увага зосереджена на підвищенні ефективності використання теплонасосних технологій на базі низькопотенційних джерел енергії, які характерні для електростанцій з метою одержання когенераційного ефекту. Для цього застосовано інструментарій математичного моделювання процесів в запропонованій системі та визначено перспективні напрямки застосування теплонасосних технологій на електростанціях для визначення можливості надійного забезпечення когенераційних потреб споживачів. Обґрунтовано умови раціонального використання скидної низькопотенційної теплоти електростанцій для теплонасосних технологій, які доцільно використовувати в теплових схемах електростанцій, для чого застосовано інструментарій чисельного моделювання з використанням прикладної програми CoolPack. На підставі аналізу результатів чисельного моделювання визначено доцільність використання теплонасосних технологій для когенераційних потреб. Для визначення ефективності теплонасосних технологій для когенерації використано ексергетичний метод, що дозволило встановити вплив основних елементів теплонасосної установки, які найбільше впливають на втрати енергії при утилізації циркуляційної води електростанцій, та визначають доцільність її використання. В роботі обґрунтовано технічну можливість застосування теплонасосних технологій для когенераційних цілей на засадах енергозберігаючих технологій і екологічної безпеки. Обґрунтовано, що використання запропонованих систем є перспективним напрямком для України, яка відчуває дефіцит власних енергоресурсів, бо дає можливість підвищити частку заміщення органічного палива та зменшити об'єм теплових викидів в довкілля. Узагальнення результатів використання теплонасосних технологій для електростанцій на базі ексергетичного методу дозволяє більш точно визначати енергетичні параметри процесів, які відбуваються в системі.

Ключові слова: ексергетичний аналіз; моделювання процесів; ефективність; теплонасосна система, електростанції, низькопотенційні джерела енергії

Метою роботи є обґрунтування ексергетичної ефективності використання теплонасосних технологій для когенераційних потреб споживачів на засадах енергозберігаючих технологій, що дозволяє обрати раціональний шлях їх практичної реалізації.

До теперішнього часу практична реалізація теплонасосних технологій (ТНТ) в технологічних схемах виробництва електроенергії та теплоти відсутня. Існуючі пропозиції не надають змоги оцінити ефективність застосування теплонасосних технологій для теплових схем електростанцій, як задля підвищення ефективності теплонасосного циклу, так і задля підвищення технологічної ефективності систем централізованого кондиціювання і теплопостачання [1].

Інструментарій аналізу ефективності використання теплових насосів для когенераційних технологій із застосуванням ексергетичного методу аналізу дозволяє обґрунтовано обрати раціональні шляхи практичної реалізації технологічних рішень.

Тепловий насос (ТН) вимагає витрати роботи для передачі теплоти від низькопотенційного джерела до високопотенційного.

Існує кінцева межа ефективності теплових насосів – коефіцієнт перетворення теплоти, який не є коефіцієнтом корисної дії:

$$COP = Q_n / W,$$

де Q_n – теплопродуктивність;

W – потужність приводу ТН.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Якість енергії залежить від її здатності перетворюватися на інші види енергії. Якщо механічна робота в ідеальному процесі може бути повністю перетворена в інший вид енергії, то теплота, навіть в ідеальному процесі, лише частково перетворюється на механічну роботу.

Енергетична ефективність ТН оцінюється коефіцієнтом перетворення:

$$\varphi = g_k / l,$$

де $g_k = T_k \cdot \Delta S$ – питомий тепловий потік в конденсаторі, що є сумою $g_e = T_e \cdot \Delta S$ – питомої теплоти у випарнику та $l = (T_k - T_e) \cdot \Delta S$ – питомої роботи в компресорі.

Рівняння енергобалансу для ТН $g_k = g_e + l$ відповідає першому закону термодинаміки [1].

Ефективність ідеального теплового насосу:

$$\varphi_{id} = T_k / (T_k - T_e),$$

де T_k і T_e – температура в конденсаторі і випарнику, відповідно.

Енергія механічна і електрична можуть бути необмежено перетворені в інші форми енергії, отже, являють собою ексергію.

Ексергетичний метод розрахунків роботи теплонасосних систем дозволяє більш точно оцінити їх термодинамічну ефективність.

Енергія теплоти складається з ексергії і анергії. Анергія – частина енергії, що не перетворюється, коли тепловий потік має температуру довкілля T_{nc} .

Міру перетворення теплоти в роботу характеризує її працездатність (ексергію теплоти). Ексергія – максимальна робота, яку може виконати термодинамічна система у разі переходу з існуючого стану до стану рівноваги з довкіллям.

Термодинамічна досконалість ТН визначається його ексергетичним ККД.

При постійній температурі T (при $T < T_{nc}$), тепловий потік g_k , а його ексергія e_g та анергія a_g пов'язані між собою рівняннями [2].:

$$g_k = e_g + a_g; \quad e_g = g_e (T - T_{nc}) / T = g \cdot \tau_e; \quad a_g = g \cdot T_{nc} / T = g \cdot (1 - \tau_e),$$

де τ_e – ексергетична температурна функція, яка дорівнює термічному ККД прямого зворотного циклу Карно і є функцією термодинамічного стану системи і навколишнього середовища.

Ступінь термодинамічної досконалості енергоустановок визначається ексергетичним ККД:

$$\eta = E_e / E_n = (E_n - D_e) / E_n,$$

де E_e і E_n – відведена і підведена ексергія, відповідно;

D_e – втрати ексергії [2].

Ексергетичний ККД ТН при підводі теплоти у довкілля, коли ексергія ТН у випарнику дорівнює нулю становить:

$$\eta_e = e_{gk} / l = g_k \tau_e / l = \varphi \cdot \tau_e,$$

де e_{gk} – відведена питома ексергія теплового потоку в конденсаторі ТН.

В реальній ТНУ ексергетичний ККД, значення якого використовується для оцінки її досконалості, завжди менше одиниці.

Найбільш перспективним напрямом застосування теплонасосних технологій для когенераційних цілей є утилізація низькопотенційної теплоти циркуляційної води охолодження конденсаторів парових турбін.

Температура циркуляційної води після конденсаторів звичайно 20...30 °С, що є високоефективним джерелом для ТН, бо при застосуванні парокомпресійного теплонасосного циклу (рис. 1) можна отримати температуру теплоносія 60...70 °С, з коефіцієнтом трансформації COP ($\varphi > 4$). Для розрахунку парокомпресійних циклів теплового насосу використано CoolPack 1.46 [6].

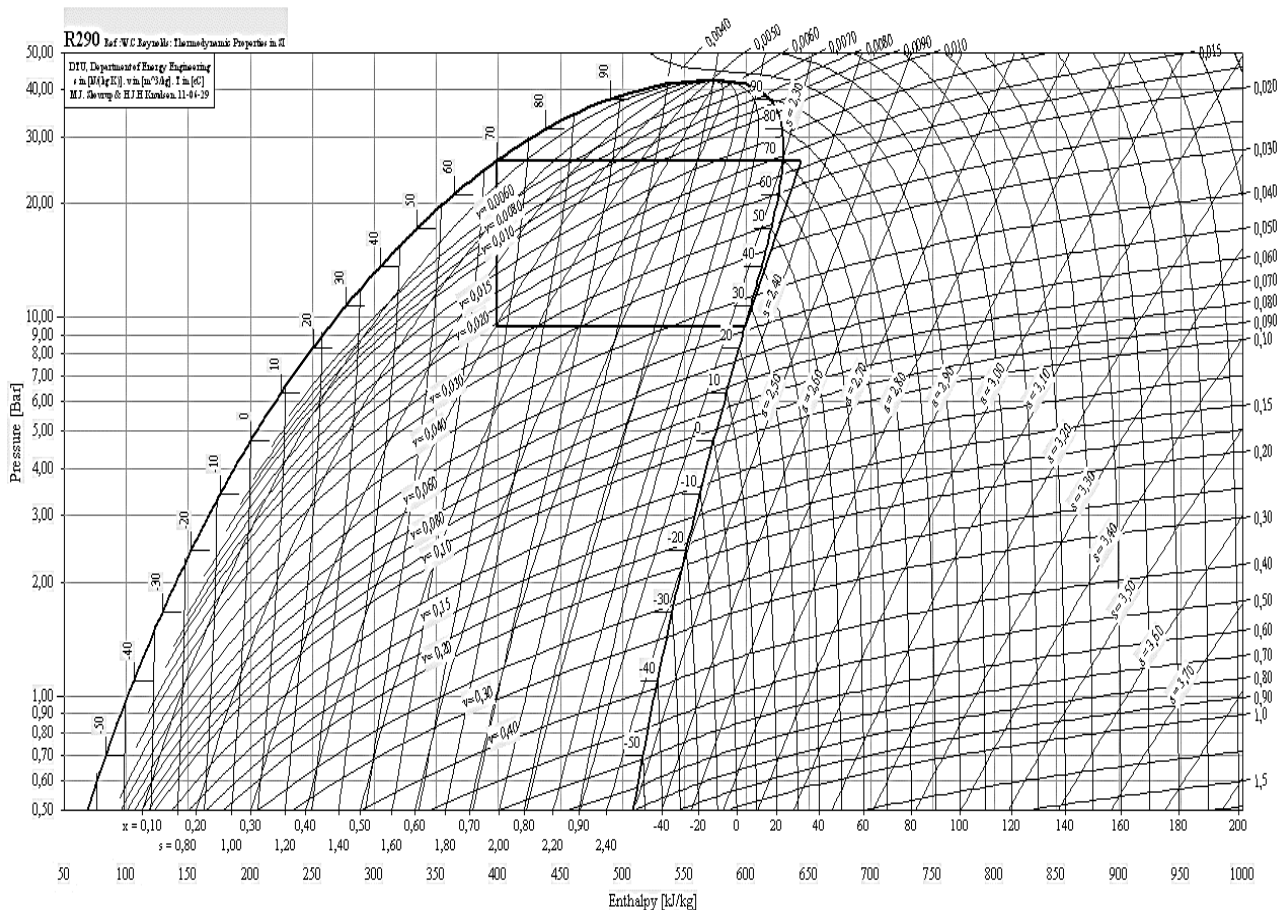


Рис. 1. Парокомпресійний цикл ТН побудований засобами CoolPack [2]

При реалізації ТНТ для теплопостачання та кондиціювання виробничих приміщень (рис. 2) можна використовувати взимку низькопотенційну теплоту циркуляційної води після конденсаторів ПТ. В той же час, зменшення температури циркуляційної води призводить до підвищення ефективності циклу електростанції.

Коли різниця температур джерел теплоти T_1 і T_2 збільшується, а COP теплового насосу зменшується, ефективним засобом збільшення величини COP є використання каскадної схеми (рис. 3) [4].

В каскадній схемі ТН нижній контур містить компресор КР1, конденсатор К, терморегулюючий вентиль РК1 і випарник В. Другий контур, де циркулює другий холодильний агент, містить компресор КР1, конденсатор К, терморегулюючий вентиль РК2 і випарник В. Конденсатор ВК нижнього контуру для першого холодильного агента в верхньому контурі є випарником [4].

При каскадній схемі застосування ТНТ можна отримати теплоносії високих параметрів, що дає змогу використовувати таку схему для централізованого теплопостачання споживачів, а також надає можливість використання теплоносія в технологічній схемі електростанцій.

На електростанціях існують технологічні потреби в теплопостачанні внутрішніх об'єктів, а саме, безпосередньо використання теплоти в теплових схемах. Наприклад, для хімічного водоочищення додаткової води 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.

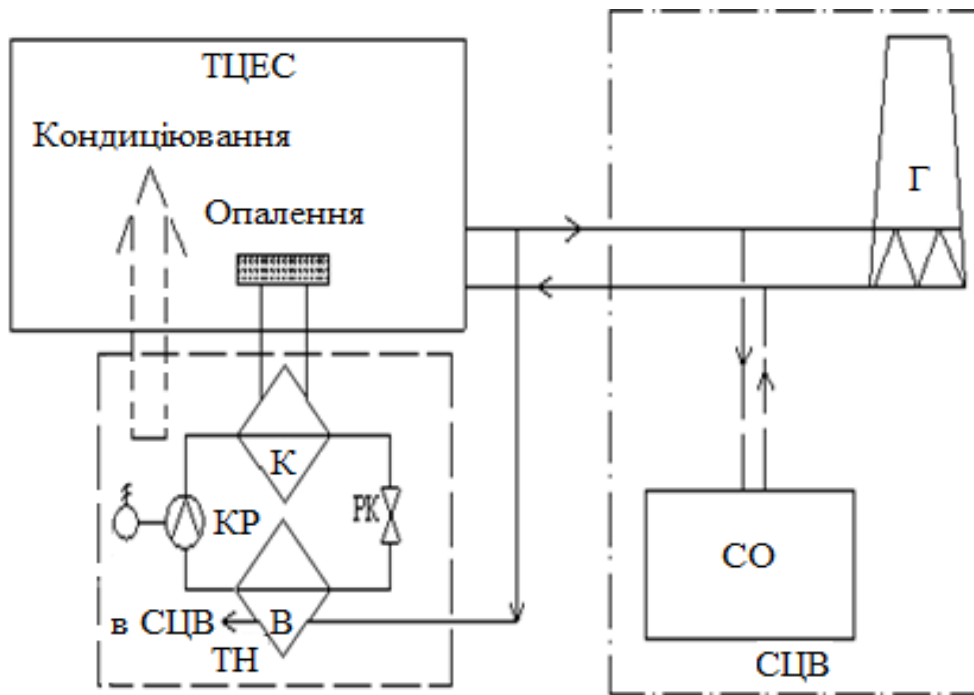


Рис. 2. ТПТ на електростанціях для теплопостачання та кондиціонування:
 ЕД – електродвигун; КР – компресор; К – конденсатор; РК – терморегулюючий
 вентиль; В – випарник; ТН – тепловий насос; СЦВ – система циркуляційного
 водозабезпечення; СО – ставок охолоджувач; Г – градирня

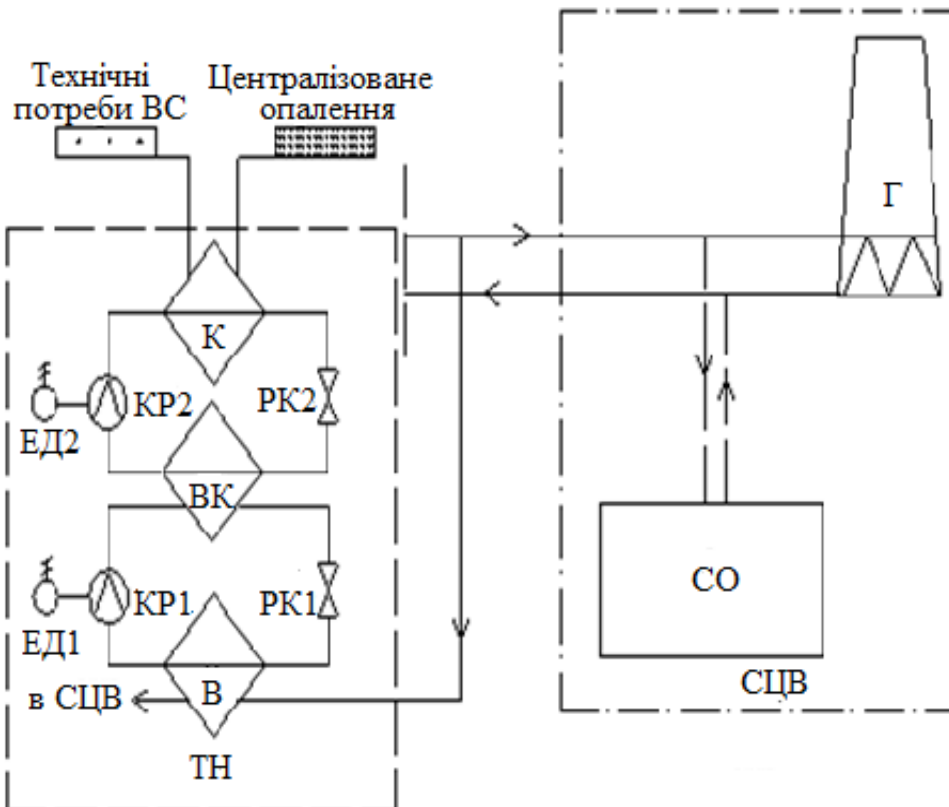


Рис. 3. ТПТ для систем централізованого опалення
 та технологічних потреб:

ЕД – електродвигун; КР – компресор; К – конденсатор; РК – терморегулюючий
 вентиль; В – випарник; ТН – тепловий насос; СЦВ – система циркуляційного
 водозабезпечення; СО – ставок охолоджувач; Г – градирня

Принципова схема теплонасосної системи, яка використовує низькопотенційну енергію скидних вод, представлена на рис. 4.

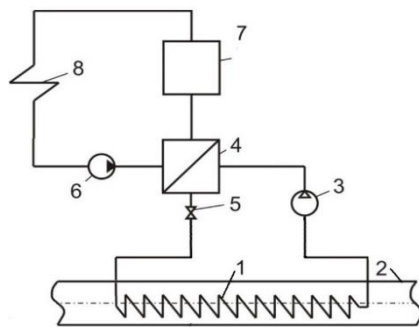


Рис. 4. Принципова схема ТН на базі циркуляційної води:

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

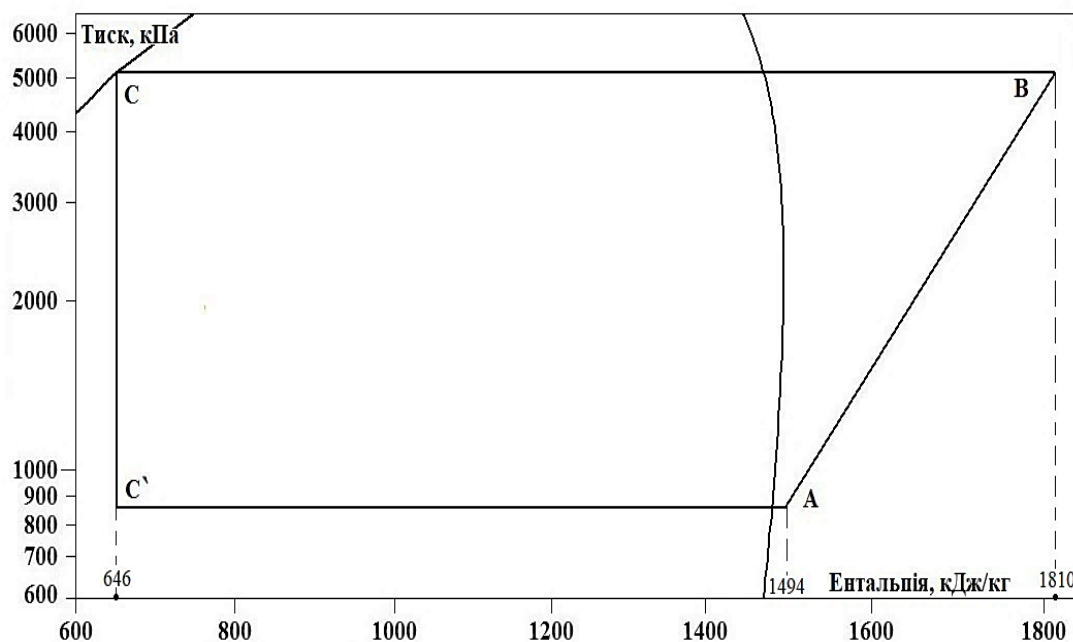


Рис. 5. Цикл ТН з використанням теплоти скидних вод електростанцій:
А – вхід до компресора робочого тіла; В – вихід з компресора робочого тіла;
С – завершення конденсації робочого тіла

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

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

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 ТН 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 агента.

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.

Таким чином, використання ТН технологій в теплових схемах електростанцій для кондиціонування в літній сезон період року дає змогу підвищити ефективність роботи персоналу та технологічного обладнання. А в холодний період року ТН можна застосовувати для теплопостачання.

Застосування каскадної схеми ТН надає можливість отримати теплоносії високих параметрів, що можна використати для технологічних потреб ЕС та для централізованого теплопостачання побутових споживачів. При використанні ТН технологій також зменшиться викид шкідливих речовин, зокрема парникових газів в порівнянні із звичайними видами теплопостачання та зменшить теплове забруднення навколишнього середовища при роботі ЕС, що є актуальним для нинішнього екологічного стану довкілля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Denysova A. E., Mazurenko A. S., Denysova A. S. "Efficiency Growth of Interaction of Combined cycle Cogeneration Plant with the Heat Supply System". *Problemele Energeticii Regionale Termoenergetică*. 2015; 2 (28): 89–95. – URL: http://journal.ie.asm.md/assets/files/11_02_28_2015.pdf.
2. Denysova A., Hieu N. M. "Analysis of exergy parameters of biogas power plant". *Problemele Energeticii Regionale Termoenergetică*. 2014; 2 (25): 86–92. – URL: <http://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyij-zhurnal-n-326-2014>.
3. Denysova A. E., Klymchuk O. A., Ivanova L. V., Zhaivoron O. S. "Energy Efficiency of Heat Pumps Heating Systems at Subsoil Waters for South-East Regions of Europe". *Problemele Energeticii Regionale*. 2020; 4 (48): 78–89. – URL: <https://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni-jurnal-448-2020>.
4. Denysova A. A., Ivanov P., Mazurenko A. S., Zhaivoron O. S. "Perfection of an energy-economic and environmental parameters of the ground source heat pump systems with preventing freezing of the soil around ground pipes". *Problemele Energeticii Regionale Termoenergetică*. 2024; 2 (62): – URL: 108–120. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.10>.
5. Іванов П. О., Мазуренко А. С. «Забезпечення ефективності теплонасосної системи». *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD*. – URL: <https://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2024/05/Zbirnik-tez-MicroCAD-2024.pdf>.
6. Jakobsen B. D., Rasmussen M. J., Skovrup S. E., Andersen. "Application package CoolPack 1.46". *Department of Energy Engineering. Technical University of Denmark*. – URL: <http://en.ipu.dk/Indhold/refrigeration-and-energy-technology/coolpack.aspx#>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.82>

UDC 004.94:620.91

Exergy efficiency of the heat pump technologies for cogeneration purposes

Alla E. Denysova¹⁾

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Ukrainian-Polish Institute
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3906-3960>; alladenysova@gmail.com. Scopus Author ID: 57193405766

Pavlo O. Ivanov¹⁾

Postgraduate Student of the Department of Thermal Power Plants and Energy Saving Technologies
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8897-0222>; 7873780@ukr.net

¹⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

A methodology for analysing the exergy efficiency of processes in elements of cogeneration systems using heat pump technologies has been proposed, which made it possible to determine the effectiveness of solutions and choose a rational path for their practical implementation. The work focuses on increasing the efficiency of using heat pump technologies based on low-potential energy sources, which are typical for power plants, in order to obtain a cogeneration effect. For this purpose, the tools of mathematical modelling of processes in the proposed system have been used and promising areas of application of heat pump technologies at power plants have been identified to determine the possibility of reliable provision of cogeneration needs of consumers. The conditions for rational use of low-potential waste heat from power plants for heat pump technologies, which are expedient to use in thermal schemes of power plants, have been substantiated, for which the tools of numerical modelling using the CoolPack application program have been applied. Based on the analysis of the results of numerical modelling, the feasibility of using heat pump technologies for cogeneration needs has been determined. To determine the efficiency of heat pump technologies for cogeneration, the exergy method was used, which made it possible to establish the influence of the main elements of the heat pump installation, which have the greatest impact on energy losses during the utilization of the circulating water of the power plant, and determine the feasibility of its use. The paper substantiates the technical feasibility of using heat pump technologies for cogeneration purposes on the basis of energy-saving technologies and environmental safety. It is substantiated that the use of the proposed systems is a promising direction for Ukraine, which is experiencing a shortage of its own energy resources, because it makes it possible to increase the share of substitution of organic fuel and reduce the volume of heat emissions into the environment. Generalization of the results of using heat pump technologies for power plants based on the exergy method allows for more accurate determination of the energy parameters of the processes occurring in the system.

Keywords: Exergy analysis; modelling; efficiency; heat pump system, power plants, low-potential energy sources