

УДК 621.577

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2023.1\(490\).15](https://doi.org/10.15589/znп2023.1(490).15)**ASSESSMENT OF THE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF HEAT PUMP APPLICATION AT SHIPBUILDING ENTERPRISES****ОЦІНКА ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА НА ПІДПРИЄМСТВАХ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ****Mykola V. Bosyi**

bosiymv@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3090-0427

Olena A. Bosa

bosaoa@ukr.net

ORCID: 0000-0001-7621-6631

М. В. Босий,

викладач

О. А. Боса,

лаборант

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi**Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький*

Abstract. Modern changes taking place in the field of heat supply in Ukraine require the development and creation of modern renewable technologies for heat supply and hot water supply of buildings of shipbuilding enterprises. The article examines the problem of using a heat pump (HT) operating on alternative energy sources for heat supply and hot water supply to buildings of shipbuilding enterprises. In its work, TN uses low-potential heat from natural sources of the environment.

Purpose. The aim of the work is to evaluate the thermodynamic efficiency of using the «water-water» and «soil-water» TN cycle at shipbuilding enterprises.

Method. A thermodynamic analysis of the characteristics was performed and the peculiarities of the operation of TN for shipbuilding enterprises were evaluated. The factors that affect the energy efficiency of TN are determined. In its work, TN uses low-potential heat from natural sources of environmental heat.

The results. On the basis of the conducted thermodynamic studies, it was established that the advantage of water and soil as natural sources of heat is that TN can work almost everywhere. A promising way to increase the efficiency of the heat supply equipment of shipbuilding enterprises is the use of TN during the annual cycle of its operation, which is indicated by the SOR of TN «water-water» 3.5 and the exergetic coefficient of useful action of TN «water-water» 38%.

Scientific novelty. To increase the efficiency of the TN, a scheme for selecting low-potential heat using water and soil TN is proposed. TNs have a significant advantage over other thermal power plants. They consume energy from renewable sources, reduce electricity costs by more than half – this is a fully automated device.

Practical significance. The use of TN for the disposal of low-potential heat flows is economically and effectively beneficial. The analysis of the efficiency of heat supply systems shows that in modern economic conditions, the trend of heat supply systems can develop with the use of steam-compression heating systems, this can significantly increase the economic and technical characteristics of heat supply equipment for buildings of shipbuilding enterprises. According to the calculations, the SOR of the soil-water TN is 3.6, and the exergy coefficient of the useful effect of the soil-water TN is 40%.

Key words: heat pump; shipbuilding enterprises; low-potential heat source; heat supply systems; transformation coefficient; exergetic efficiency coefficient of TN.

Анотація. Сучасні зміни, які відбуваються в галузі теплопостачання в Україні потребують розробки та створення сучасних відновлювальних технологій для теплопостачання та гарячого водопостачання будівель підприємств кораблебудування. У статті розглядається проблема використання теплового насоса (ТН), що працює на альтернативних джерелах енергії для теплопостачання та гарячого водопостачання будівель підприємств кораблебудування. У своїй роботі ТН використовує низькопотенційну теплоту природних джерел довкілля.

Мета. Метою роботи є оцінка термодинамічної ефективності використання циклу ТН «вода-вода» та «грунт-вода» на підприємствах кораблебудування.

Методика. Виконано термодинамічний аналіз характеристик та оцінені особливості роботи ТН для підприємств кораблебудування. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність ТН. Проаналізовано вплив тривалості температур джерел теплоти різних величин на теплопродуктивність ТН.

Результати. На підставі проведених термодинамічних досліджень встановлено, що перевагою води та ґрунту як природних джерел теплоти є те, що ТН можуть працювати практично всюди. Перспективним способом підвищення ефективності теплопостачального обладнання підприємств кораблебудування є застосування ТН при річному циклі його роботи, на що вказує COP ТН «вода-вода» 3,5 та ексергетичний коефіцієнт корисної дії ТН «вода-вода» 38%.

Наукова новизна. Для підвищення ефективності роботи ТН запропоновано схему відбору низькопотенційної теплоти з використанням водяного та ґрунтового ТН. ТН мають значну перевагу перед іншими теплоенергетичними установками. Вони споживають енергію поновлюваних джерел, знижують витрати на електропостачання більш, ніж в половину – це повністю автоматизований пристрій.

Практична значимість. Використання ТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно і ефективно вигідно. Аналіз ефективності систем теплопостачання показує, що в сучасних економічних умовах тенденція систем теплопостачання може розвиватися із застосуванням парокомпресійних ТН, це може суттєво підвищити економічні і технічні характеристики теплопостачального обладнання для будівель підприємств кораблебудування. За розрахунками COP ТН «ґрунт-вода» 3,6, а ексергетичний коефіцієнт корисної дії ТН «ґрунт-вода» 40%.

Ключові слова: тепловий насос; підприємства кораблебудування; низькопотенційне джерело теплоти; системи теплопостачання; коефіцієнт трансформації; ексергетичний коефіцієнт корисної дії ТН.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нині об'єми вуглеводнів, таких як газ, нафта, зовсім не є нескінченними. Але застосування їх на даний час пов'язане з негативним впливом на екосистему землі. Натепер одним з важливих питань, яке стоїть перед Україною для нагального вирішення, є питання забезпечення енергетичної та екологічної безпеки підприємств кораблебудування.

Актуальним та першочерговим завданням ефективного розвитку промисловості в Україні є вирішення проблеми енергозбереження, як в економічному секторі, так і на підприємствах кораблебудування при використанні енергетичних потоків різної якості.

Первинні природні енергетичні ресурси займають провідне місце в енергетичних системах більшості країн. Але, незважаючи на це, необхідно впроваджувати альтернативні та відновлювальні джерела енергії, особливо, сучасні теплонасосні технології [1-7].

Перспективним напрямком на даному етапі є використання природних джерел енергії ТН для теплопостачання будівель підприємств кораблебудування. Методи використання теплової енергії докіль загалом економічно вигідно, але частка використання низькопотенційних джерел теплоти невелика.

Підвищити ефективність систем теплопостачання для потреб підприємств кораблебудування можливо при наявності теплових агрегатів, таких як компресійні теплові насоси при використанні природних джерел енергії, особливо води, ґрунту [3].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Маючи високі показники енергоефективності ТН, все більше роблять вибір на користь цих систем для теплопостачання і нагрівання води на підприємствах кораблебудування різного призначення. Витративши 1 кВт електричної енергії, можна отримати 3–5 кВт для теплопостачання [3, 8-12].

Принцип роботи компресійного ТН «вода-вода» та «ґрунт-вода» наведений на рис. 1.

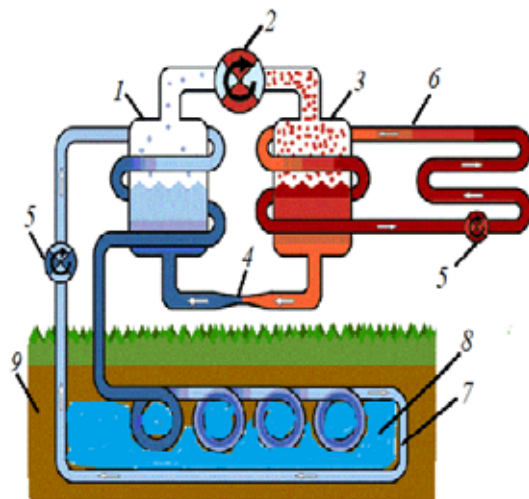


Рис. 1. Схема компресійного ТН «вода-вода» та «ґрунт-вода»

Пароподібний агент надходить на вхід компресора 2. Компресор 2 стискає газ, при цьому його тиск і температура збільшуються. Нагрітий газ подається в теплообмінник (конденсатор) 3, в якому він охолоджується та передає свою теплоту теплоносію (вода) в системі теплопостачання 6 і конденсується – переходить в рідкий стан.

Далі по контуру на шляху рідини високого тиску встановлений розширювальний вентиль (дросель) 4, який знижує тиск агента. Компресор 2 і дросель 4 ділять замкнений гідралічний контур на дві частини: високого і низького тиску. Під час проходження через дросель 4 частина рідини випаровується і температура потоку знижується. Далі цей потік надходить в теплообмінник (випарник) 1, який пов'язаний

із навколишнім середовищем (наприклад, теплою водою 8 або ґрунту 9). Тепло від води 8 та ґрунту 9 передається антифризу в колекторі 7, який надходить у випарник 1. При низькому тиску та температурі, нижчій температурі води 8 або ґрунту 9, рідина випаровується (перетворюється на газ). Внаслідок цього частина теплоти води 8 або ґрунту 9 перетворюється у внутрішню енергію агента. Пароподібний агент знову надходить в компресор 2 – контур замикається [13-18].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Традиційні системи теплопостачання для будівель підприємств кораблебудування при технологічній підготовці можуть бути суттєво підвищені при впровадженні сучасних теплонасосних технологій теплопостачання та енергозбереження. Доцільність та ефективність застосування теплонасосних технологій, в першу чергу, відноситься до утилізації всіх природних низькотемпературних джерел теплоти довкілля – це стосується повітря, води річкової та морської, ґрунту, ґрунтових вод [2, 3, 19-22].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є оцінка термодинамічної ефективності застосування циклу ТН «вода-вода» та «ґрунт-вода» на підприємствах кораблебудування.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження. Основні теоретичні положення роботи отримані з використанням термодинамічного та ексергетичного методів аналізу.

Об'єктом дослідження є оцінка термодинамічної ефективності застосування ТН «вода-вода» та «ґрунт-вода» для процесу теплопостачання будівель підприємств кораблебудування.

Предметом дослідження є дослідження термодинамічної ефективності циклу ТН «вода-вода» та «ґрунт-вода» для підприємств кораблебудування.

Розрахункова принципова схема ТН з використанням в системі теплопостачання підприємств кораблебудування наведена на рис. 2 [2, 3, 23-25].

Проведемо дослідження термодинамічної ефективності ТН при різних значеннях температури джерел теплоти – води та ґрунту.

Аналіз енергоефективності ТН «вода-вода» та «ґрунт-вода», проводився для робочого тіла пропану. Для пропану температура випаровування становить $t_v = 1...3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а конденсації – $t_k = 68...69\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вибираємо низькопотенційне джерело теплоти. Вода або ґрунт на вході у випарник має температуру $t'_{нт} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на виході з нього $t''_{нт} = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура мережевої води (теплоносія) на вході у конденсатор становить $t'_{мв} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на виході з нього – $t''_{мв} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ [26, 28, 30].

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

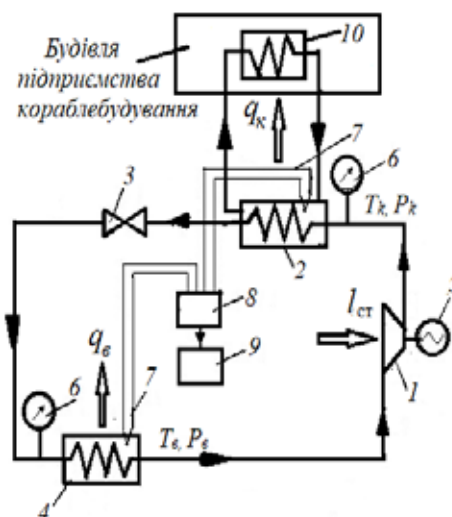
Термодинамічний розрахунок циклу ТН «вода-вода» та «ґрунт-вода» наступний [15-23].

Температура насиченої пари пропану на виході з випарника

$$T_v = T''_{нт} - \Delta T_v. \quad (1)$$

Температура конденсації пропану в конденсаторі

$$T_k = T''_{мв} + \Delta T_k. \quad (2)$$



1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – дросель; 4 – випарник; 5 – електродвигун; 6 – манометри; 7 – термопари; 8 – перемикач термопар; 9 – потенціометр; 10 – система теплопостачання підприємства кораблебудування

Рис. 2. Принципова схема ТН в системі теплопостачання для будівель підприємств кораблебудування

Питома робота стиснення в компресорі

$$l_{\text{ст}} = h_2 - h_1. \quad (3)$$

Питоме теплове навантаження випарника

$$q_b = h_1 - h_4. \quad (4)$$

Питома теплова потужність конденсатора

$$q_k = h_2 - h_3. \quad (5)$$

Правильність розрахунку визначається перевіркою теплового балансу

$$l_{\text{ст}} + q_b = q_k. \quad (6)$$

Питома витрата електроенергії ТН на одиницю виробленої теплоти

$$E_{\text{ТН}} = l_{\text{ст}} / q_k. \quad (7)$$

Питома енергія, яка споживається електродвигуном

$$W = l_{\text{ст.}} / \eta_{\text{ем.}} \cdot \eta_e, \quad (8)$$

де $\eta_{\text{ем.}} = 0,95$ – електромеханічний ККД компресора, $\eta_e = 0,8$ – ККД електродвигуна.

Коефіцієнт трансформації ТН

$$\text{COP} = \text{COP}_t \cdot \eta_{\text{ТН}}, \quad (9)$$

де $\eta_{\text{ТН}}$ – коефіцієнт, який враховує реальні процеси, що здійснюються робочим тілом у ТН, який змінюється в діапазоні 0,6...0,8 (приймаємо $\eta_{\text{ТН}} = 0,7$) [15, 18]; COP_t – теоретичний коефіцієнт трансформації ТН.

Ексергетичний розрахунок ТН «вода-вода» та «грунт-вода» виконаний на основі визначення ексергій та ексергетичного балансу підведеної і відведеної ексергії в кожному елементі обладнання ТН «вода-вода» та «грунт-вода» [24-27, 29].

Ексергетичний ККД ТН «вода-вода» та «грунт-вода» показує ступінь термодинамічної досконалості ТН і розраховується, як відношення відведеної від ТН ексергії до підведеної ексергії [15, 18, 24-27, 30]

$$\eta_{\text{ex}} = e_{\text{від.}} / e_{\text{під.}}, \quad (10)$$

де $e_{\text{від.}} = e_b$ – сума відведеної від ТН ексергії; $e_{\text{під.}} = e_n + e_e$ – сума підведеної до ТН ексергії; e_b – питома ексергія, відведена середовищем, яке нагрівається від конденсатора ТН; e_n – питома ексергія, підведена до випарника низькопотенційного джерела теплоти; e_e – питома ексергія електричної енергії, підведеної до компресора на його привід.

Ексергія отримана високопотенційним джерелом у конденсаторі

$$e_b = \tau_b q_k, \quad (11)$$

де τ_b – ексергетична температура високопотенційного теплоносія

$$\tau_b = \frac{T_{\text{ср.мв}}^{\text{к}} - (t_{\text{н.с.}} + 273)}{T_{\text{ср.мв}}^{\text{к}}}. \quad (12)$$

Середня логарифмічна температура гарячого теплоносія

$$T_{\text{ср.мв}}^{\text{к}} = \frac{t_{\text{мв}}'' - t_{\text{мв}}'}{\ln \frac{t_{\text{мв}}'' + 273}{t_{\text{мв}}' - 273}}. \quad (13)$$

Ексергія, віддана низькопотенційним теплоносієм у випарнику

$$e_n = \tau_n q_b, \quad (14)$$

де τ_n – ексергетична температура низькопотенційного теплоносія

$$\tau_n = \frac{T_{\text{ср.нт}}^{\text{в}} - (t_{\text{н.с.}} + 273)}{T_{\text{ср.нт}}^{\text{в}}}, \quad (15)$$

де $t_{\text{н.с.}}$ – температура навколишнього середовища.

Середня логарифмічна температура низькопотенційного теплоносія

$$T_{\text{ср.нт}}^{\text{в}} = \frac{t_{\text{нт}}' - t_{\text{нт}}''}{\ln \frac{t_{\text{нт}}' + 273}{t_{\text{нт}}'' - 273}}. \quad (16)$$

Ексергія електроенергії, що витрачається на привід компресора

$$e_e = W = \frac{l_{\text{ст.}}}{\eta_{\text{ем.}} \eta_e}. \quad (17)$$

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати проведеного вище термодинамічного розрахунку циклу ТН «вода-вода» та «грунт-вода» наведені в табл. 1.

Ефективність роботи ТН «вода-вода» та «грунт-вода» визначається наступними факторами: температурним режимом роботи, коефіцієнтом перетворення теплового насоса COP , видом агента, вартістю електричної енергії, яка витрачається на привід компресора та ексергетичним коефіцієнтом корисної дії ТН.

ВИСНОВКИ

1. Використання ТН для теплопостачання є перспективним напрямком використання альтернативних природних низькопотенційних джерел енергії для забезпечення потреб систем теплопостачання та гарячого водопостачання будівель підприємств кораблебудування, але даний процес суттєво залежить від місцезнаходження об'єкта та наявності доступу до певного оптимального для нього джерела низькопотенційної теплової енергії.

2. Як видно з термодинамічного розрахунку ТН «вода-вода» та «грунт-вода» можуть покривати теплове навантаження будівель підприємств кораблебудування в достатніх температурних діапазонах.

Таблиця 1. Термодинамічний розрахунок ТН «вода-вода» та «грунт-вода»

Параметр	Розмірність	Розрахунок	
		ТН «вода-вода»	ТН «грунт-вода»
Температура випаровування пропану, T_v	К	274	276
Тиск пропану у випарнику, p_v	МПа	0,45	0,48
Температура конденсації пропану, T_k	К	341	342
Ентальпія пропану після конденсатора, h_3	кДж/кг	205	210
Тиск конденсації пропану, p_k	МПа	2,57	2,65
Ентальпія пропану на вході в компресор, h_1	кДж/кг	525	538
Ентальпія пропану після компресора, h_2	кДж/кг	645	654
Питоме теплове навантаження випарника, q_v	кДж/кг	320	328
Питоме теплове навантаження конденсатора, q_k	кДж/кг	440	444
Робота стиснення в компресорі, $l_{ст}$	кДж/кг	120	116
Перевірка теплового балансу ТН, $q_{тб.тн}$	-	440	444
Коефіцієнт перетворення теплоти, COP	-	3,5	3,6
Ексергетичний ККД ТН, $\eta_{ек}$	-	0,38	0,40

3. Ефективним джерелом низькопотенційної теплової енергії є тепло води та ґрунту, при цьому коефіцієнт перетворення COP ТН «вода-вода» за розрахун-

ками становить 3,5, а для ТН «грунт-вода» складає 3,6. Ексергетичний коефіцієнт корисної дії ТН «вода-вода» становить 38%, а для ТН «грунт-вода» 40%.

REFERENCES

- [1] Bezrodnyi, M. K., Prytula, N. O. (2013). Termodynamichna efektyvnist tep-lonasosnykh skhem teplopostachannia [Thermodynamic efficiency of heat pump schemes of heat supply]. *Visnyk Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. № 3. pp. 39-45. [in Ukrainian].
- [2] Bezrodnyi, M. K., Halan, M. A. (2011). Termodynamichna efektyvnist teplonasosnykh system povitrianoho opalennia [Thermodynamic efficiency of heat pump air heating systems]. *Naukovi visti NTU «KPI»*. № 6. pp. 30-35. [in Ukrainian].
- [3] Bosyi, M. V. (2022). Teplovi nasosy dlia opalennia ta hariachoho vodoposta-channia ahropromyslovykh pidpriemstv [Heat pumps for heating and hot water supply of agro-industrial enterprises]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ah-rarnoho universytetu. Serii «Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychych protsesiv»*. vypusk № 2 (48). pp. 3-8. [in Ukrainian].
- [4] Maliarenko, V. A., Lysak, L. V. (2004). Enerhetyka, dovykillia, enerhozbere-zhennia [Energy, environment, energy saving]. Kh: Rubikon. 368 p. [in Ukrainian].
- [5] Bezrodnyi, M. K., Pukhovyi, I. I., Kutra, D. S. (2013). Teplovi nasosy ta yikh vykorystannia. Navchalnyi posibnyk [Heat pumps and their use]. Kyiv: NTUU «KPI». 312 p. [in Ukrainian].
- [6] Ostapenko, O. P. (2015). Kholodylna tekhnika i tekhnolohiia. Teplovi nasosy. Navchalnyi posibnyk [Refrigeration equipment and technology. Heat pumps]. Vinnytsia: VNTU. 123 p. [in Ukrainian].
- [7] Arseniev, V. M., Melechuk, S. S. (2018). Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku [Heat pumps: basics of theory and calculation]. Navchalnyi posibnyk. Sumy: SDU. 364 p. [in Ukrainian].
- [8] Arseniev, V. M. 2009. Teplonasosna tekhnolohiia enerhozberezhennia [Heat pump energy saving technology. Heat pump energy saving technology]. Sumy: *Vyd-vo. SDU*. 251 p. [in Ukrainian].
- [9] Bosyi, M. V., Kuzyk, O. V. (2022). Teplovi nasosy dlia opalennia ta hariachoho vodopostachannia [Heat pumps for heating and hot water supply]. Rezultaty suchasnykh inzhenernykh doslidzhen i rozrobok: Naukova monohrafiia. Ryha. Latviia: «Baltija Publishing». pp. 24-40. [in Ukrainian]. URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
- [10] Pysariev, V. Ye. (2002). Teplovi nasosy ta kholodylni ustanovky [Heat pumps and refrigeration units]. Navchalnyi posibnyk. K: KNUBA. 124p.
- [11] Sniezshkin, Yu. F., Chalaiev, D. M., Shavrin, V. S., Dabizha, N. O. (2008). Teplovi nasosy v systemakh teplokhodopostachannia [Heat pumps in heating and cooling systems]. Pid. red. akad. NAN Ukrainy A.A. Dolynskoho. *NAN Ukrainy, Instytut tekhnichnoi teplofizyky*. 104 p.
- [12] Bezrodnyi, M. K., Prytula, N. O. (2012). Enerhoefektyvnist teplonasosnykh skhem teplopostachannia [Energy efficiency of heat pump schemes of heat supply]. Monohrafiia. K: NTUU «KPI». 208 p. [in Ukrainian].
- [13] Shevel, V. Y. (2004). Rabota kompressorov seriinogo ispolneniya na smeci propan-butan v teplonasosnom rezhime raboti [The operation of series compressors for propane-butane oil in the heat pump mode of operation]. *Kompressorная tekhnika i pnevmatika v KhKhI veke: KhIII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya po kompressorostroeniyu*. Symu: SumHU. pp. 239-244. [in Russian].
- [14] Khmelniuk, M. H., Martyniuk, M. O. (2008). Pidvyshchennia efektyvnosti ustanovky nyzkotemperaturnoi kondensatsii pryrodnoho hazu [Increasing the efficiency of the low-temperature natural gas condensation installation]. Odesa: ODAKh. *Tekhnichni hazy*. № 4. pp. 30-35. [in Russian].

- [15] Bosyi, M. V., Kuzyk, O. V. (2020). Efektyvnist tsykladu teplovoho nasosa dlia teplopостachannia [Efficiency of the heat pump cycle for heat supply]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. № 3(34). pp.136-142. [in Ukrainian]. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>.
- [16] Bosyi, M. V. (2022). Termodynamichna enerhoefektyvnist heothermalnogo teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh [Thermodynamic energy efficiency of a geothermal heat pump on groundwater]. *Moderni aspekty vedy: XX. Dil mezinarodni kolektivni monografii. Mezinarodni Ekonomicky Institut s.r.o. Ceska republika: Vydavnycha hrupa. «Veddecka perspektiva»*. pp. 556-568. [in Ukrainian]. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html.
- [17] Bosyi, M. V. (2022). Teplovi nasosy – enerhoefektyvne vidnovliuvalne ekolohichno chysto dzherelo toploty [Heat pumps are an energy-efficient, renewable, environmentally friendly source of heat]. *Moderni aspekty vedy: XXI Dil mezinarodni kolektivni monografii. Mezinarodni Ekonomicky Institut s.r.o. Ceska republika: Vydavnycha hrupa. «Veddecka perspektiva»*. pp. 357-380. [in Ukrainian]. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>.
- [18] Moroziuk, T. V. (2006). Teoriya kholodilnikh mashin i teplovikh nasosov [Theory of refrigerating machines and heat pumps]. Odessa: Studiia «Negotsiant». 712 p. [in Russian].
- [19] Tkachenko, S. I., Ostapenko, O. P. (2009). Parokompresiini teplonasosni ustanovky v systemakh teplopостachannia [Steam compression heat pump installations in heat supply systems]. *Monohrafiia. Vinnytsia: VNTU*. 176 p. [in Ukrainian].
- [20] Arseniev, V. M., Hrehanenko, V. A. (2002). Ekslerhetichna otsinka efektyvnosti teplonasosnoi tekhnolohii enerhozberezhennia [Exergetic evaluation of the effectiveness of heat pump energy saving technology]. *Visnyk SumDU*. № 9 (42). pp. 81-85. [in Ukrainian].
- [21] Sirko, Z. S., Korenda, V. A., Vyshniakov, I. Yu., Protasov, O. S., Okhrimenko, S. M., Tsiren, N. L. (2020). Vykorystannia teplovykh nasosiv dlia opalennia ta hriachoho vodopostachannia budivel pidpriemstv na prykladi ustanovok Helioterm [The use of heat pumps for heating and hot water supply of enterprise buildings on the example of Heliotherm installations]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy. Tekhnolohiia ta enerhetyka silskohospodarskoi promyslovosti*. № 5 (87). [in Ukrainian].
- [22] Bosyi, M. V., Kropivnyi, V. M., Kuzyk, O. V., Kropivna, A. V., Molokost L. A. (2022). Termodynamichna enerhoefektyvnist parokompresiinoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. Kropyvnytskyi*. № 5(36). pp. 47-54. [in Ukrainian]. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html.
- [23] Bosyi, M. V., Kropivnyi, V. M., Kuzyk, O. V. (2022). Termodynamichne doslidzhennia tsykladu teplovoho nasosa «grunt-voda» dlia systemy opalennia prymishchennia [Thermodynamic energy efficiency of a vapor compression heat pump on groundwater]. *Naukovyi zhurnal Visnyk Kremenchutskoho natsionalnogo universytetu imeni M. Ostrohradskoho. Kremenchuk*. № 1(132). pp. 165-172. [in Ukrainian]. URL: <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>.
- [24] Bosyi, M. V. (2022). Enerhetichna efektyvnist povitrianoho teplovoho nasosa na ekolohichno chystomu robochomu tili propani [Energy efficiency of an air source heat pump on an environmentally friendly propane fuel]. *Naukovyi zhurnal «Vcheni zapysky Tavrskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskoho»*. Seria: Tekhnichni nauky». Kyiv: T. 33 (72). № 4. pp. 144-148. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>.
- [25] Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ya., Manuilovych, V. V., Panishko, O. V. (2021). Efektyvnist tsykladu heothermalnogo teplovoho nasosa [Efficiency of the geothermal heat pump cycle]. V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Aktualni problemy suchasnoi nauky, suspilstva ta osvity» (28-30 lystopada) NVTs «Sci-conf.com.ua». Kharkiv. Ukraina. pp. 418-422. [in Ukrainian]. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>.
- [26] Bosyi M. V., Lysenko A. Ya., Manuilovych V. V., Barkar M. M. (2021). Termodynamichna enerhoefektyvnist heothermalnogo teplovoho nasosa «voda-voda» [Thermodynamic energy efficiency of the water-to-water geothermal heat pump]. 3-ya Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Suchasna nauka: innovatsii ta perspektyvy» (5-7 hrudnia) SSPG Publish, Stockholm, Shvetsiia. ISBN 978-91-87224-02-7. 1036 p. [in Ukrainian]. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>.
- [27] Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ya., Manuilovych, A. V., Panishko, O. V., Barkar, M. M. (2022). Heothermalnyi teplovyi nasos «grunt-voda» [Ground-water geothermal heat pump]. 2-ha Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Suchasni doslidzhennia u svitovii nautsi» (15-17 travnia) NVTs «Sci-conf.com.ua». Lviv. Ukraina. ISBN 978-966-8219-86-3. pp. 406-413. [in Ukrainian]. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>.
- [28] Bosyi, M. V., Bosa, O. A., Lysenko, Yu. A. Ya., Manuilovych, V. V., Be-lchenkov, Ye. V., Shevchenko, O. A., Herasymenko, I. O. (2022). Termodynamichne doslidzhennia tsykladu teplovoho nasosa «grunt-voda» [Thermodynamic study of the soil-water heat pump cycle]. KhI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Ievraziiski naukovyi diskusii» (21-23 lystopada) Barca Academy Publishing, Barselona. Ispaniia. pp. 97-103. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-21-23.11.22.pdf>.
- [29] Bosyi, M. V., Bosa, O. A., Lysenko, A. Ya., Manuilovych, A. A. V., Be-lchenkov, Ye. V., Botnarenko, V. O., Avramenko, Ye. V. (2022). Teplovyi nasos «grunt-voda» [Ground-water heat pump]. 3-ya Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Nauka i tekhnolohii: problemy, perspektyvy ta innovatsii» (14-16 hrudnia 2022 r.) CPN Publishing Group. Osaka, Yaponiia. pp.163-168. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-17-19.11.22.pdf>.
- [30] Bosyi, M. V., Bosa, O. A., Lysenko, A. Ya., Manuilovych, A. V., Belchenkov, Ye. V., Shevchenko, O. A., Herasymenko, I. O. (2022). Enerhoefektyvnist tsykladu teplovoho nasosa «grunt-voda» [Energy efficiency of the soil-water heat pump cycle]. I Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Naukovi doslidzhennia v suchasnomu sviti» (9-11 lystopada) Perfect Publishing, Toronto. Kanada. pp. 303-309. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-9-11.11.22.pdf>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Безродний, М. К., Притула, Н. О. (2013). Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання. *Вісник Вінницького національного технічного університету*. № 3. С. 39–45.
- [2] Безродний, М. К., Галан, М. А. (2011). Термодинамічна ефективність теплонасосних систем повітряного опалення. *Наукові вісті НТТУ «КПІ»*. № 6. С. 30–35.
- [3] Босий, М. В. (2022). Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання агропромислових підприємств. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. випуск № 2 (48). С. 3–8.
- [4] Маляренко, В. А., Лисак, Л. В. (2004). Енергетика, довкілля, енергозбереження. Х: Рубікон. 368 с.
- [5] Безродний, М. К., Пуховий, І. І., Кутра, Д. С. (2013). Теплові насоси та їх використання. Навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ». 312 с.
- [6] Остапенко, О. П. (2015). Холодильна техніка і технологія. Теплові насоси. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 123 с.
- [7] Арсенєв, В. М., Мелєйчук, С. С. (2018). Теплові насоси: основи теорії і розрахунку. Навчальний посібник. Суми: СДУ. 364 с.
- [8] Арсенєв, В. М. (2009). Теплонасосна технологія енергозбереження. Суми: Вид-во. СДУ. 251 с.
- [9] Босий, М. В., Кузик, О. В. (2022). Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання. Результати сучасних інженерних досліджень і розробок: Наукова монографія. Рига. Латвія: «Baltija Publishing». С. 24–40. URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
- [10] Писарев, В. С. (2002). Теплові насоси та холодильні установки. Навчальний посібник. К: КНУБА. 124 с.
- [11] Снежкін, Ю. Ф., Чалаєв, Д. М., Шаврін, В. С., Дабіжа, Н. О. (2008). Теплові насоси в системах теплохолодопостачання. Під. ред. акад. НАН України А.А. Долинського. НАН України, Інститут технічної теплофізики. 104 с.
- [12] Безродний, М. К., Притула, Н. О. (2012). Енергоефективність теплонасосних схем теплопостачання. Монографія. К: НТУУ «КПІ». 208 с.
- [13] Шевель, В. І. (2004). Работа компрессоров серийного исполнения на смеси пропан-бутан в теплонасосном режиме работы. Компрессорная техника и пневматика в XXI веке: XIII Международная научно-техническая конференция по компрессоростроению. Сумы: СумГУ. С. 239–244.
- [14] Хмельнюк, М. Г., Мартинюк, М. О. (2008). Підвищення ефективності установки низькотемпературної конденсації природного газу. Одеса: ОДАХ. *Технічні газети*. № 4. С. 30–35.
- [15] Босий, М. В., Кузик, О. В. (2020). Ефективність циклу теплового насоса для теплопостачання. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. № 3(34). С. 136–142. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>.
- [16] Босий, М. В. (2022). Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса на ґрунтових водах. *Moderní aspekty vědy: XX. Díl mezinárodní kolektivní monografie Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Vydavnická grupa. «Vědecká perspektiva»*. С. 556–568. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html.
- [17] Босий, М. В. (2022). Теплові насоси – енергоефективне відновлювальне екологічно чисто джерело теплоти. *Moderní aspekty vědy: XXI Díl mezinárodní kolektivní monografie Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Vydavnická grupa. «Vědecká perspektiva»*. С. 357–380. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
- [18] Морозюк, Т. В. (2006). Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса: Студия «Негоциант». 712 с.
- [19] Ткаченко, С. І., Остапенко, О. П. (2009). Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія. Вінниця: ВНТУ. 176 с.
- [20] Арсенєв, В. М., Гречаненко, В. А. (2002). Ексергетична оцінка ефективності теплонасосної технології енергозбереження. *Вісник СумДУ*. № 9 (42). С. 81–85.
- [21] Сірко, З. С., Коренда, В. А., Вишняков, І. Ю., Протасов, О. С., Охріменко, С. М., Цірен, Н. Л. (2020). Використання теплових насосів для опалення та гарячого водопостачання будівель підприємств на прикладі установок Геліотерм. *Наукові доповіді НУБіП України. Технологія та енергетика сільськогосподарської промисловості*. № 5 (87).
- [22] Босий, М. В., Кропівний, В. М., Кузик, О. В., Кропівна, А. В., Молокост, Л. А. (2022). Термодинамічна енергоефективність парокомпресійного теплового насоса на ґрунтових водах. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький. № 5(36). С. 47–54. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html
- [23] Босий, М. В., Кропівний В. М., Кузик О. В. (2022). Термодинамічне дослідження циклу теплового насоса «ґрунт-вода» для системи опалення приміщення. *Науковий журнал Вісник Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського*. Кременчук: № 1(132). С. 165–172. URL: <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>.
- [24] Босий, М. В. (2022). Енергетична ефективність повітряного теплового насоса на екологічно чистому робочому тілі пропані. *Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського». Серія: Технічні науки*. Київ: Т. 33 (72). № 4. С. 144–148. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>
- [25] Босий, М. В., Лисенко, А. Я., Мануйлович, В. В., Панішко, О. В. (2021). Ефективність циклу геотермального теплового насоса. V Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми сучасної науки, суспільства та освіти» (28–30 листопада) *HBLЦ «Sci-conf.com.ua»*. Харків. Україна. С. 418–422. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>

- [26] Босий, М. В., Лисенко, А. Я., Мануйлович, В. В., Баркар, М. М. (2021). Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса «вода-вода». 3-я Міжнародна науково-практична конференція «Сучасна наука: інновації та перспективи» (5-7 грудня) *SSPG Publish*, Стокгольм, Швеція. ISBN 978-91-87224-02-7. 1036 с. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>.
- [27] Босий, М. В., Лисенко, А. Я., Мануйлович, А. В., Панішко, О. В., Баркар, М. М. (2022). Геотермальний тепловий насос «грунт-вода». 2-га Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні дослідження у світовій науці» (15-17 травня) *НВЦ «Sci-conf.com.ua»*. Львів, Україна. ISBN 978-966-8219-86-3. С. 406-413. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>.
- [28] Босий, М. В., Боса, О. А., Лисенко, Ю. А. Я., Мануйлович, В. В., Бельченков, Є. В., Шевченко, О. А., Герасименко, І. О. (2022). Термодинамічне дослідження циклу теплового насоса «грунт-вода». XI Міжнародна науково-практична конференція «Євразійські наукові дискусії» (21-23 листопада) *Barca Academy Publishing*, Барселона, Іспанія. С. 97-103. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-21-23.11.22.pdf>
- [29] Босий, М. В., Боса, О. А., Лисенко, А. Я., Мануйлович, А. А. В., Бельченков, Є. В., Ботнаренко, В. О., Авраменко, Є. В. (2022). Тепловий насос «грунт-вода». 3-я Міжнародна науково-практична конференція «Наука і технології: проблеми, перспективи та інновації» (14-16 грудня 2022 р.) *CPN Publishing Group*, Осака, Японія. С. 163-168. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-17-19.11.22.pdf>
- [30] Босий, М. В., Боса, О. А., Лисенко, А. Я., Мануйлович, А. В., Бельченков, Є. В., Шевченко, О. А., Герасименко, І. О. (2022). Енергоефективність циклу теплового насоса «грунт-вода». I Міжнародна науково-практична конференція «Наукові дослідження в сучасному світі» (9-11 листопада) *Perfect Publishing*, Торонто, Канада. С. 303-309. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-9-11.11.22.pdf>

© М. В. Босий, О. А. Боса

Дата надходження статті до редакції: 25.03.2023

Дата затвердження статті до друку: 09.04. 2023