

УДК 621.577
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).8](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).8)

COMPARATIVE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF AIR-WATER, SOIL-WATER, WATER-WATER HEAT EXHAUSTS

ПОРІВНЯЛЬНИЙ ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ «ПОВІТРЯ-ВОДА», «ГРУНТ-ВОДА», «ВОДА-ВОДА»

Mykola V. Bosyi
bosymv@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3090-0427

Olena A. Bosa
bosaoa@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7621-6631

М. В. Босий,
старший викладач

О. А. Боса,
лаборант

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

Abstract. In the field of heat supply in Ukraine, as well as in other countries, including, for example, Germany, Sweden, Norway, Finland, France, England, Poland, Switzerland, the USA, Canada, China, Japan, etc., alternative technologies for heat and hot water supply for both residential buildings and premises of enterprises in any industry, especially machine-building enterprises, are currently being created, developed and implemented. The paper considers a comparative analysis of the use of heat pumps (HPs) "air-to-water", "ground-to-water", "water-to-water", which operate in particular on natural low-potential renewable energy sources: air, ground, water for heat supply and hot water supply of both residential and industrial premises. The working bodies for air-water, soil-water, and water-water TN at the current stage are the use of environmentally safe natural hydrocarbon refrigerants, for example, such as butane, isobutane, propane.

Purpose. The purpose of this work is a comparative thermodynamic analysis of "air-water" "soil-water" "water-water" TN with their effective application for residential and production premises of machine-building enterprises.

Method. The comparative method of thermodynamic analysis was performed for the "air-water" "soil-water" "water-water" TN for residential and industrial premises of machine-building enterprises. The conditions affecting the thermodynamic efficiency of air-water, soil-water, and water-water TN have been defined.

The results. A modern way to increase the thermodynamic efficiency of heat supply equipment is to use TN "air-water", "soil-water", "water-water" for residential premises, as well as premises of industrial enterprises of mechanical engineering. Having performed a comparative thermodynamic analysis of the study, it was found that the advantage as a natural energy source is the use of water heat, while the heat transformation coefficient of the COP TN "water-water" is 4.0, and the exergy efficiency of the TN "water-water" is 44%.

Scientific novelty. A comparative thermodynamic analysis of the TN "air-water", "soil-water", "water-water" for residential premises, as well as production premises of mechanical engineering enterprises, was carried out, proposing to increase the thermodynamic efficiency of the TN operation, developing a principle scheme for the utilization of low-potential energy, using the TN "air-water", "soil-water", "water-water" with promising natural refrigerants. It was established that the TN "air-water", "soil-water", "water-water" have significant advantages over traditional heat supply systems, firstly, they consume energy from renewable sources, and secondly, they reduce the cost of using electricity by almost half, which is currently relevant for the process of energy saving.

Practical significance. Currently, the use of "air-water", "soil-water", "water-water" TN for residential premises, as well as machine-building production enterprises, is beneficial both from the ecological, economic, and thermodynamic point of view. Comparative thermodynamic analysis of the efficiency of heat supply systems shows that the use of "air-water", "soil-water", "water-water" heating elements significantly increases the economic and technical characteristics of heat supply equipment for residential premises, as well as production premises of machine-building enterprises. According to the calculations of SOR TN "air-water", "soil-water", "water-water" 3.6; 3.8; 4.0, and the exergy coefficient of the useful action of the "air-water", "soil-water", "water-water" TN is 38%; 40%; 44%.

Key words: heat pump; heat of air; soil; water; heat supply; transformation coefficient; exergetic efficiency of TN.

Анотація. В галузі теплопостачання в Україні, а також і в інших країнах, серед яких, наприклад, Німеччині, Швеції, Норвегії, Фінляндії, Франції, Англії, Польщі, Швейцарії, США, Канаді, Китаї, Японії та ін. на сучасному етапі створюються, розробляються та впроваджуються альтернативні технології для тепло-та гарячого водопостачання як житлових будівель, так і для приміщень підприємств в будь-яких галузях виробництва, особливо машинобудівних підприємств. У роботі розглядається порівняльний аналіз використання теплових насосів (ТН) «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода», які працюють зокрема на природних низькопотенційних відновлювальних джерелах енергії: повітря, ґрунту, води для теплопостачання та гарячого водопостачання як житлових, так і промислових приміщень. Робочими тілами для ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» на теперішньому етапі є використання екологічно безпечних природних холодоагентів вуглеводнів, наприклад, таких як бутан, ізобутан, пропан.

Мета. Метою даної роботи є порівняльний термодинамічний аналіз ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» з ефективним застосування їх для житлових і виробничих приміщень підприємств машинобудування.

Методика. Порівняльний метод термодинамічного аналізу виконували для ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для житлових і виробничих приміщень підприємств машинобудування. Проведено визначення умов, які впливають на термодинамічну ефективність ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода».

Результати. Сучасним способ підвищення термодинамічної ефективності теплопостачального обладнання є використання ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для житлових приміщень, а також приміщень виробничих підприємств машинобудування. Виконавши порівняльний термодинамічний аналіз дослідження, з'ясовано, що перевагою як природного джерела енергії є використання теплоти води, при цьому коефіцієнт трансформації теплоти COP ТН «вода-вода» становить 4,0, а ексергетичний коефіцієнт корисної дії ТН «вода-вода» – 44%.

Наукова новизна. Проведено порівняльний термодинамічний аналіз ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для житлових приміщень, а також виробничих приміщень підприємств машинобудування, запропонувавши підвищити термодинамічну ефективність роботи ТН, розробивши принципову схему утилізації низькопотенційної енергії, застосувавши ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» з перспективними природними холодильними агентами. Встановлено, що ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» мають вагомі переваги перед традиційними системами теплопостачання, вони, по-перше, споживають енергію відновлювальних джерел, по-друге, знижують затрати на використання електроенергії майже в половину, що актуально натеper для процесу енергозбереження.

Практична значимість. Нині застосування ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для житлових приміщень, а також виробничих підприємств машинобудування вигідно як з екологічної, економічної, так і термодинамічної сторони. Порівняльний термодинамічний аналіз ефективності систем теплопостачання показує, що застосування ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода», суттєво підвищує економічні і технічні характеристики теплопостачального обладнання для житлових приміщень, а також виробничих приміщень підприємств машинобудування. За розрахунками COP ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» 3,6; 3,8; 4,0, а ексергетичний коефіцієнт корисної дії ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» 38%; 40%; 44%.

Ключові слова: тепловий насос; теплота повітря; ґрунту; води; теплопостачання; коефіцієнт трансформації; ексергетичний ККД ТН.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Наразі використання природних видів палива для теплоенергетичних установок в традиційних системах теплопостачання в Україні є відносно проблематичним. Однією із загальнонаважливих задач є забезпечення енергетичної, екологічної та ефективної безпеки систем теплопостачання житлових будівель та приміщень підприємств, особливо в галузі машинобудування.

Натеper актуальним завданням ефективного розвитку галузі теплопостачання є вирішення проблеми енергозбереження як в цілому, так і для житлових будівель та приміщень підприємств, особливо в галузі машинобудування. Враховуючи, що природні енергетичні ресурси займають вагоме місце в енергетичній системі теплопостачання, все ж таки потрібно впроваджувати поновлювальні природні джерела енергії, це стосується сучасних теплонасосних технологій, які застосовують в усьому світі,

особливо в країнах Європи та Північній Америці, а також Азії [1–7].

Наразі актуальним напрямком сьогодення є застосування низькопотенційних природних джерел енергії в ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для теплопостачання житлових будівель та приміщень підприємств, особливо в галузі машинобудування.

Отже, підвищення термодинамічної ефективності систем теплопостачання для потреб житлових будівель та приміщень підприємств, особливо в галузі машинобудування можливо при використанні ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» з природними теплоносіями енергії – це повітря, ґрунт і вода [3].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Завдяки високим показникам термодинамічної енергоефективності ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» натеper вони мають широке застосування

для систем теплопостачання і нагрівання води для житлових будівель та приміщень підприємств, особливо в машинобудівній галузі різного призначення. Отже при затраті 1 кВт електричної енергії, можливо отримати 3–5 кВт теплової енергії для теплопостачання [3, 8–12].

Принцип роботи ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» наведений на рис. 1.

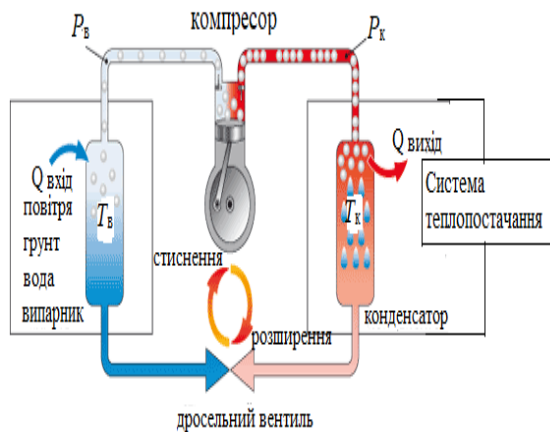


Рис. 1. Схема ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода»

Газоподібний робочий агент з випарника надходить до компресора, в ньому він стискається, при цьому підвищується тиск і температура газу. Далі нагрітий газ поступає в конденсатор, тут він охолоджується при передачі теплоти теплоносію води в системі теплопостачання та конденсується і перетворюється в рідину.

За допомогою дросельного вентиля встановленого по контуру на шляху рідини високого тиску, зменшується тиск робочого агента. Під час проходження через дросель частина рідини буде випаровуватися і температура потоку знижується. Після дроселя потік агента поступає у випарник, який пов'язаний із навколишнім середовищем теплою повітря, ґрунту і води. Теплота від повітря, ґрунту, води передається робочому агенту, який надходить у випарник. При низькому тиску та температурі, нижчій температури повітря, ґрунту та води рідина відповідно випаровується та перетворюється на газ. При цьому частина теплоти повітря, ґрунту, води перетворюється у внутрішню енергію агента. А робочий агент у вигляді газу знову поступає в компресор і теплонасосний цикл знову повторюється [13–18].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Традиційні системи теплопостачання для систем теплопостачання житлових будівель та приміщень підприємств, особливо в галузі машинобудування різного призначення можливо суттєво підвищити при впровадженні новітніх теплонасосних технологій теплопостачання та енергозбереження. Ефективність

і доцільність використання теплонасосних технологій, відноситься до утилізації природних низькотемпературних джерел теплоти довкілля – це стосується повітря, води річкової та морської, ґрунту, ґрунтових вод [2, 3, 18–22].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є проведення порівняльного термодинамічного аналізу ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для систем теплопостачання житлових будівель та приміщень підприємств, особливо в галузі машинобудування різного призначення.

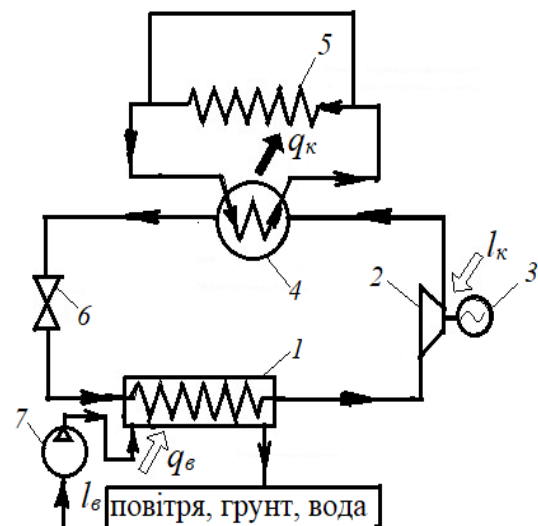
МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження. При проведенні порівняльного термодинамічного дослідження ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для систем теплопостачання житлових будівель та приміщень підприємств в галузі машинобудування різного призначення використовували термодинамічний та ексергетичний методи аналізу.

Об'єктом дослідження є ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода».

Предметом дослідження є дослідження порівняльної термодинамічної ефективності використання ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для теплопостачання житлових будівель та приміщень підприємств машинобудування.

Принципова схема ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» з використанням в системі теплопостачання житлових будівель та приміщень підприємств в галузі машинобудування різного призначення наведена на рис. 2 [2, 3, 23–25].



1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун; 4 – конденсатор; 5 – система теплопостачання для приміщення; 6 – дросель; 7 – подача повітря, теплоти ґрунту, води

Рис. 2. Принципова схема ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» в системі теплопостачання приміщень для житлових будівель і підприємств

Проведемо дослідження порівняльної термодинамічної ефективності ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для житлових будівель та приміщень підприємств машинобудівної галузі різного призначення при різних значеннях температури джерела теплоти – повітря, ґрунту і води.

Порівняльний термодинамічний аналіз енергоефективності ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» проводиться для безпечного робочого тіла ізобутану. Термодинамічні характеристики для ізобутану наступні: температуру випаровування приймаємо $t_b = 2...4^\circ\text{C}$, а конденсації – $t_k = 65...70^\circ\text{C}$. Низькопотенційними джерелами теплоти вибираємо повітря, ґрунт і воду, на вході у випарник маємо температуру $t'_{нт} = 10^\circ\text{C}$, а на виході з нього $t''_{нт} = 5^\circ\text{C}$. Температура теплоносія (води) на вході у конденсатор становить $t'_{мв} = 20^\circ\text{C}$, а на виході з нього – $t''_{мв} = 58^\circ\text{C}$ [26, 28, 29].

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Виконаємо порівняльний термодинамічний розрахунок циклу ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» за наступною методикою [14–23].

Температура насиченої пари бутану на виході з випарника

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

Температура конденсації ізобутану в конденсаторі

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

Питома робота стискування пари ізобутану в компресорі

$$l_{ст} = h_2 - h_1. \quad (3)$$

Питоме теплове навантаження випарника

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

Питома теплова потужність конденсатора

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

Перевіряємо правильність розрахунку за перевіркою теплового балансу ТН

$$l_{ст} + q_b = q_k. \quad (6)$$

Питома витрата електроенергії ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» на одиницю виробленої теплоти

$$E_{тн} = l_{ст} / q_k. \quad (7)$$

Питома енергія, яка споживається електродвигуном

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

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

Коефіцієнт трансформації ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода»

$$COP = COP_{тн} \quad (9)$$

де $\eta_{тн}$ коефіцієнт, який враховує реальні процеси, що здійснюються робочим тілом ізобутаном у ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода», який змінюється в діапазоні $0,65...0,8$ [14, 17]; $COP_{тн}$ – теоретичний коефіцієнт трансформації ТН.

Ексергетичний розрахунок ТН «грунт-вода» виконаний на основі визначення ексергій та ексергетичного балансу підведеної і відведеної ексергії в кожному

елементі обладнання ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» [24–27, 29].

Ексергетичний ККД ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» – це відношення відведеної від ТН ексергії до підведеної ексергії і він вказує на ступінь термодинамічної досконалості ТН [14, 17, 23–26, 29]

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

де $e_{від} = e_b$ – сума відведеної від ТН ексергії; $e_{під} = e_n + e_e$ – 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 [29].

Ексергія отримана високопотенційним джерелом у конденсаторі

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

де τ_b – ексергетична температура високопотенційного теплоносія

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

Середня логарифмічна температура нагрітого теплоносія

$$T_{кр.мв}^k = \frac{t''_{мв} - t'_{мв}}{\ln \frac{t''_{мв} + 273}{t'_{мв} + 273}}. \quad (13)$$

Ексергія, віддана низькопотенційним теплоносієм у випарнику

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

де τ_n – ексергетична температура низькопотенційного теплоносія

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

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

Середня логарифмічна температура низькопотенційного теплоносія

$$T_{кр.нт}^b = \frac{t'_{нт} - t''_{нт}}{\ln \frac{t'_{нт} + 273}{t''_{нт} + 273}}. \quad (16)$$

Ексергія електроенергії на привід компресора

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

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати порівняльного термодинамічного розрахунку циклу ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» наведені в табл. 1.

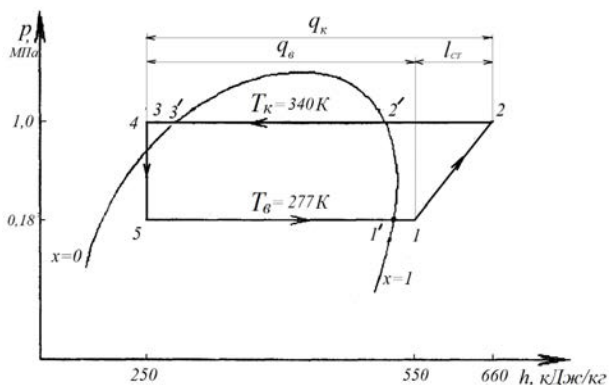
На рис. 3 наведено приклад роботи термодинамічного циклу ТН «вода-вода» в p - h -діаграмі.

Термодинамічна ефективність роботи циклу ТН «вода-вода», як показано на рис. 3, буде визначатися наступними факторами: температурним режимом роботи; коефіцієнтом трансформації теплового насоса COP ТН; видом робочого тіла; вартістю електричної

Таблиця 1. Порівняльний термодинамічний розрахунок ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» [30, 31]

Параметр	Розмірність	Розрахунок		
		ТН «вода-вода»	ТН «грунт-вода»	ТН «повітря-вода»
Температура випаровування ізобутану, T_v	К	277	276	274
Тиск ізобутану у випарнику, p_v	МПа	0,18	0,2	0,19
Температура конденсації ізобутану, T_k	К	340	342	341
Тиск конденсації ізобутану, p_k	МПа	1,0	1,2	1,15
Ентальпія ізобутану на вході в компресор, h_1	кДж/кг	550	560	555
Ентальпія ізобутану після компресора, h_2	кДж/кг	660	670	665
Ентальпія ізобутану після конденсатора та на вході у випарник, $h_3 = h_4$	кДж/кг	250	252	251
Питоме теплове навантаження випарника, q_v	кДж/кг	310	308	304
Питоме теплове навантаження конденсатора, q_k	кДж/кг	410	418	414
Робота стиснення в компресорі, l_{ct}	кДж/кг	110	110	110
Перевірка теплового балансу ТН, $q_{тб.тн}$	-	410	418	414
Коефіцієнт перетворення теплоти, COP	-	4,0	3,8	3,6
Ексергетичний ККД ТН, η_{ex}	-	0,44	0,40	0,38

енергії; ексергетичним коефіцієнтом корисної дії ТН. Коефіцієнт трансформації для ТН «вода-вода» складає 4,0. Ексергетичний коефіцієнт корисної дії для ТН «вода-вода» становить 44%.

Рис. 3. Цикл ТН «вода-вода» в p - h -діаграмі

ВИСНОВКИ

1. Натеper застосування ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» для теплопостачання є дуже перспективним напрямком використання поновлювальних природних низькопотенційних джерел енергії, особливо теплоти повітря, ґрунту і води для забезпечення потреб систем теплопостачання та

гарячого водопостачання житлових будівель та приміщень підприємств машинобудування.

2. Як видно з порівняльного термодинамічного розрахунку табл. 1 ефективним джерелом низькопотенційної теплової енергії є теплота повітря, ґрунту і води коефіцієнт перетворення COP ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» складає 3,6; 3,8; 4,0. Ексергетичний коефіцієнт корисної дії для ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» становить 38%; 40%; 44%. Для ТН «вода-вода» ці показники значно вищі, ніж для ТН «повітря-вода», «грунт-вода».

3. Запропоновано принципову схему утилізації низькопотенційної енергії, застосувавши ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» з перспективними природними холодильними агентами, наприклад, ізобутаном.

4. Провівши порівняльний термодинамічний аналіз ТН «повітря-вода», «грунт-вода», «вода-вода» з'ясовано, що це енергоефективна система, яка з'явилася на ринку теплопостачання та гарячого водопостачання України, тому тепловий насос стає гідною заміною традиційному централізованому опаленню. Встановлено, що термодинамічна ефективність ТН «вода-вода» вища, ніж в інших ТН. Даний ТН «вода-вода» характеризується універсальністю, оскільки він використовується для теплопостачання приміщень в зимовий період року, а також і нагрівання води для гарячого водопостачання.

REFERENCES

- [1] Bezrodnyi, M. K., & Prytula, N. O. (2013). Termodynamichna efektyvnist tep-lonasosnykh skhem teplopstachannia [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 vodopostachannia ahropromyslovykh pidpriemstv [Heat pumps for heating and hot water supply of agro-industrial enterprises]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ah-rarnoho universytetu. Serii «Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv»*. vypusk № 2 (48). pp. 3–8 [in Ukrainian].

- [4] Maliarenko, V. A., & Lysak, L. V. (2004). Enerhetyka, dovykly, 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 enerhozberzhennia [Heat pump energy saving technology. Heat pump energy saving technology]. Sumy: Iyd-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. Latvija: «Baltija Publishing». pp. 24–40. [in Ukrainian]. Retrieved from: <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] Sniezkin, 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 teplopstachannia [Energy efficiency of heat pump schemes of heat supply]. Monohrafiia. K: NTUU «KPI». 208 p. [in Ukrainian].
- [13] 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 Ukrainian].
- [14] Bosyi, M. V., & Kuzyk, O. V. (2020). Efektyvnist tsykladu teplovoho nasosa dlia teplopstachannia [Efficiency of the heat pump cycle for heat supply]. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. № 3(34). pp. 136–142 [in Ukrainian]. Retrieved from: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>.
- [15] Bosyi, M. V. (2022). Termodynamichna enerhoefektyvnist heotermalnogo 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. «Vedecka perspektiva». pp. 556–568 [in Ukrainian]. Retrieved from: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_1.html.
- [16] Bosyi, M. V. (2022). Teplovi nasosy – enerhoefektyvne vidnovliuvalne ekolohichno chyste 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. «Vedecka perspektiva». pp. 357–380 [in Ukrainian]. Retrieved from: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
- [17] Kudelia, P. P., Solomakha, A. S., & Ocheretianko, M. D. (2016). Otsinka efektyvnosti opaliuvalnykh teplovykh nasosiv z vykorystanniam metodu tsykliu. [Evaluation of the efficiency of heating heat pumps using the method of cycles]. Vidnovliuvana enerhetyka. № 4. pp. 74–85 [in Ukrainian].
- [18] Tkachenko, S. I., & Ostapenko, O. P. (2009). Parokompresiini teplonasosni ustanovky v systemakh teplopstachannia [Steam compression heat pump installations in heat supply systems]. Monohrafiia. Vinnytsia: VNTU. 176 p. [in Ukrainian].
- [19] Arseniev, V. M., & Hrechanenko, V. A. (2002). Ekserhetychna otsinka efektyvnosti teplonasosnoi tekhnolohii enerhozberzhennia [Exergetic evaluation of the effectiveness of heat pump energy saving technology]. Visnyk SumDU. № 9 (42). pp. 81–85 [in Ukrainian].
- [20] 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 hariachoho 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].
- [21] Bosyi, M. V., Kropivnyi, V. M., Kuzyk, O. V., Kropivna, A. V., & Molokost L. A. (2022). Termodynamichna enerhoefektyvnist parokompresiinoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh [Thermodynamic energy efficiency of a vapor compression heat pump on groundwater]. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. Kropyvnytskyi. № 5(36). pp. 47–54 [in Ukrainian]. Retrieved from: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_1.html
- [22] Bosyi, M. V., Kropivnyi, V. M., & Kuzyk, O. V. (2022). Termodynamichne doslidzhennia tsykladu teplovoho nasosa «grunt-voda» dlia systemy opalennia prymishchennia [Thermodynamic study of the "soil-water" heat pump cycle for the room heating system]. Naukovyi zhurnal Visnyk Kremenchutskoho natsionalnogo universytetu imeni M.Ostrohradskoho. Kremenchuk: № 1(132). pp. 165–172. [in Ukrainian]. Retrieved from: <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>.
- [23] Bosyi, M. V. (2022). Enerhetychna 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». Seriya: 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>

- [24] Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ya., Manuilovych, V. V., & Panishko, O. V. (2021). Efektyvnist tsykladu heotermalnogo 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]. Retrieved from: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>
- [25] Bosyi M. V., Lysenko A. Ya., Manuilovych V. V., & Barkar M. M. (2021). Termodynamichna enerhoefektyvnist heotermalnogo 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]. Retrieved from: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>.
- [26] Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ya., Manuilovych, A. V., Panishko, O. V., & Barkar, M. M. (2022). Heotermalnyi 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]. Retrieved from: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>.
- [27] Bosyi, M. V., Bosa, O. A., Lysenko, Yu A. Ya., Manuilovych, V. V., Be-Ichenkov, 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 «devraziiski naukovy diskusii» (21-23 lystopada) *Barca Academy Publishing*, Barselona. Ispaniia. pp. 97–103. [in Ukrainian]. Retrieved from <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-21-23.11.22.pdf>
- [28] Bosyi, M. V., Bosa, O. A., Lysenko, A. Ya., Manuilovych, A. A. V., Be-Ichenkov, 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]. Retrieved from <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-17-19.11.22.pdf>
- [29] 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 «Naukovy doslidzhennia v suchasnomu sviti» (9-11 lystopada) *Perfect Publishing*, Toronto. Kanada. pp. 303-309. [in Ukrainian]. Retrieved from <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-9-11.11.22.pdf>
- [30] Bosyi, M. V., & Bosa, O.A. (2023). Otsinka termodynamichnoi efektyvnosti zastosuvannia teplovoho nasosa na pidpriemstvakh korablebuduvannia [Evaluation of thermodynamic efficiency of heat pump application at shipbuilding enterprises]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo universytetu korablebuduvannia imeni admiral Makarova*. Mykolaiv: № 1 (490). pp. 120–127 [in Ukrainian].
- [31] Bosyi, M. V., & Bosa, O.A. (2023). Efektyvnosti vykorystannia teplovoho nasosa «hrunt-voda» na pidpriemstvakh korablebuduvannia [Effectiveness of using a ground-water heat pump at shipbuilding enterprises]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo universytetu korablebuduvannia imeni admiral Makarova*. Mykolaiv: № 4. pp. 46–52 [in Ukrainian].

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 НТУУ «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] Арсеньєв, В. М., Мелейчук, С. С. (2018). Теплові насоси: основи теорії і розрахунку. Навчальний посібник. Суми: СДУ. 364 с.
- [8] Арсеньєв, 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] Писарєв, В. Є. (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] Хмельнюк, М. Г., Мартинюк, М. О. (2008). Підвищення ефективності установки низькотемпературної конденсації природного газу. *Одеса: ОДАХ. Технічні газу.* № 4. С. 30–35.
- [14] 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>.
- [15] 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_1.html.
- [16] Босий, М. В. (2022). Теплові насоси – енергоефективне відновлювальне екологічно чисте 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>
- [17] Куделя П. П., Соломаха А. С., Очеретянко М. Д. (2016). Оцінка ефективності опалювальних теплових насосів з використанням методу циклів. *Відновлювана енергетика.* № 4. С. 74–85.
- [18] Ткаченко, С. І., Остапенко, О. П. (2009). Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. *Монографія. Вінниця: ВНТУ.* 176 с.
- [19] Арсенев, В. М., Гречаненко, В. А. (2002). Ексергетична оцінка ефективності теплонасосної технології енергозбереження. *Вісник СумДУ.* № 9 (42). С.81–85.
- [20] 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).
- [21] Босий, М. В., Кропивний, В. М., Кузик, О. В., Кропивна, 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_1.html
- [22] Босий, М. В., Кропивний 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>.
- [23] 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>
- [24] 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) HBIJ «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>
- [25] 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>.
- [26] Босий, М. В., Лисенко, А. Я., Мануйлович, А. В., Панішко, О. В., Баркар, М. М. (2022). Геотермальний тепловий насос «ґрунт-вода». *2-га Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні дослідження у світовій науці» (15-17 травня) HBIJ «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>.
- [27] Босий, М. В., Боса, О. А., Лисенко, Ю. А. Я., Мануйлович, В. В., Бельченков, С. В., Шевченко, О. А., Герасименко, І. О. (2022). Термодинамічне дослідження циклу теплового насоса «ґрунт-вода». *XI Міжнародна науково-практична конференція «Світозійські наукові дискусії» (21-23 листопада) Barca Academy Publishing, Барселона, Іспанія.* С. 97–103. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-21-23.11.22.pdf>
- [28] Босий, М. В., Боса, О. А., Лисенко, А. Я., Мануйлович, А. А. В., Бельченков, С. В., Ботнаренко, В. О., Авраменко, С. В. (2022). Тепловий насос «ґрунт-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. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-17-19.11.22.pdf>
- [29] Босий, М. В., Боса, О. А., Лисенко, А. Я., Мануйлович, А. В., Бельченков, С. В., Шевченко, О. А., Герасименко, І. О. (2022). Енергоефективність циклу теплового насоса «ґрунт-вода». *I Міжнародна науково-практична конференція «Наукові дослідження в сучасному світі» (9-11 листопада) Perfect Publishing, Торонто, Канада.* С. 303–309. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-9-11.11.22.pdf>
- [30] Босий, М. В., Боса, О.А. (2023). Оцінка термодинамічної ефективності застосування теплового насоса на підприємствах кораблебудування. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.* Миколаїв: № 1 (490). С. 120–127. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).15](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).15) URL: <http://znp.nuos.mk.ua/archives/2023/1/15.pdf>
- [31] Босий, М. В., Боса, О.А. (2023). Ефективності використання теплового насоса «ґрунт-вода» на підприємствах кораблебудування. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.* Миколаїв: № 4. С. 46–52. URL <http://znp.nuos.mk.ua/archives/2023/4/7.pdf>

© Босий М. В., Боса О. А.

Дата надходження статті до редакції: 17.11.2024

Дата затвердження статті до друку: 25.11.2024