

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.577:658

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.01>

ОЦІНКА ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

М.В. Босий¹, О.А. Боса², Є.В. Бельченков³, О.А. Шевченко⁴

¹викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

²лаборант кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0001-7621-6631

³студент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0009-0009-3463-4179

⁴студент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0009-0006-8929-7665

Анотація

Вступ. У статті розглядається проблема використання геотермальних теплових насосів (ГТН), що працюють на альтернативних джерелах енергії для теплопостачання підприємств морського транспорту. Для теплопостачання підприємств морського транспорту використовують ГТН з низькопотенційною теплою джерел, повітря, водою і надр землі. **Метою** роботи є оцінка термодинамічної ефективності ГТН при використанні їх на підприємствах морського транспорту та морських портах. **Результати.** Виконано термодинамічний аналіз ефективності та характеристик ГТН, що працюють з різними джерелами низькопотенційної теплоти. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність ГТН, оцінені особливості роботи ґрунтових, водяних та повітряних ГТН для південних кліматичних умов України. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних величин на теплопродуктивність ГТН. Для підвищення ефективності роботи теплонасосної системи запропоновано схему вилучення низькопотенційної теплоти з використанням ґрунтового ТН і повітряного теплообмінника. На підставі проведених досліджень встановлено, що перевагою повітря як теплоносія є те, що повітряні ГТН можуть працювати практично повсюди. Новітнім способом підвищення ефективності ГТН є комбіноване

використання низькопотенційної теплоти ґрунту і повітря та забезпечує високу теплопродуктивність ГТН протягом всього року і має більш високий показник енергетичної ефективності у порівнянні з традиційними системами теплопостачання. ГТН мають значну перевагу перед іншими теплоенергетичними системами та установками. Вони споживають енергію поновлюваних джерел при зниженні витрат на електропостачання більш, ніж в половину. **Висновки.** Використання ГТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно вигідно. Термодинамічний аналіз ефективності ГТН для систем теплопостачання показує, що в сучасних економічних умовах тенденція систем теплопостачання може розвиватися в наступних напрямках: застосування парокompресійних ТН, використання вторинних енергоресурсів промислових підприємств морського транспорту. Застосування даних заходів може суттєво підвищити економічні і теплотехнічні характеристики теплопостачального обладнання для будівель підприємств морського транспорту.

Ключові слова: геотермальний тепловий насос, термодинамічний цикл, теплова енергія, низькопотенційне джерело теплоти, системи теплопостачання, коефіцієнт трансформації, термодинамічна ефективність.

ASSESSMENT OF THE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF THE GEOTHERMAL HEAT PUMP FOR HEAT SUPPLY OF SEA TRANSPORT ENTERPRISES

M.V. Bosyi¹, O.A. Bosa², E.V. Belchenkov³, O.A. Shevchenko⁴

¹Lecturer at the Department of Materials Science and Foundry
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

²Laboratory Assistant of the Department of Materials Science and Foundry
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-7621-6631

³Student of the Department of Materials Science and Foundry
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0009-0009-3463-4179

⁴Student of the Department of Materials Science and Foundry
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0009-0006-8929-7665

Summary

Introduction. The article examines the problem of using geothermal heat pumps (HTN) operating on alternative energy sources for heat supply of maritime transport enterprises. For heat supply, sea transport enterprises use heat pumps with low-potential heat from sources, air, reservoirs, and the subsoil of the earth. **The purpose of the work** is to evaluate the thermodynamic efficiency of HTNs when using them at sea transport enterprises and sea ports. **The results.** A thermodynamic analysis of the efficiency and characteristics of heat pumps operating with various sources of low-potential heat was performed. The factors affecting the energy efficiency of the HTN were determined, the peculiarities of the operation of soil, water and air HTN for the southern climatic conditions of Ukraine were evaluated. The influence of the duration of air temperatures of different values on the thermal productivity of the HTN was analyzed. In order to increase

*the efficiency of the heat pump system, a scheme for extracting low-potential heat with the use of soil TN and an air heat exchanger is proposed. Based on the conducted research, it was established that the advantage of air as a heat carrier is that air heating systems can work almost everywhere. The newest method of increasing the efficiency of the heating system is the combined use of low-potential heat of the soil and air, which ensures high thermal productivity of the heating system throughout the year and has a higher energy efficiency index compared to traditional heat supply systems. HTNs have a significant advantage over other thermal energy systems and installations. They consume energy from renewable sources while reducing electricity supply costs by more than half. **Conclusions.** The use of heat exchangers for the disposal of low-potential heat flows is economically beneficial. Thermodynamic analysis of the efficiency of heat supply systems for heat supply systems shows that in modern economic conditions, the trend of heat supply systems can develop in the following directions: the use of steam compression heat pumps, the use of secondary energy resources of industrial enterprises of sea transport. The application of these measures can significantly improve the economic and heat-technical characteristics of heat supply equipment for buildings of maritime transport enterprises.*

Key words: *geothermal heat pump, thermodynamic cycle, thermal energy, low-potential heat source, heat supply systems, transformation coefficient, thermodynamic efficiency.*

Вступ. Нині одним із ефективних і енергозберігаючих способів, що дає можливість економити паливно-енергетичні ресурси, знижувати забруднення навколишнього середовища, задовольняти потреби споживачів у технологічній теплоті є застосування теплонасосних технологій виробництва теплоти як в Україні, так і у світі в цілому. Необхідно на сучасному етапі використовувати та впроваджувати сучасні теплонасосні технології з використанням відновлювальних альтернативних природних джерел енергії, які дають можливість для енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в довкілля [1–10].

Натепер сучасним екологічним та ефективним джерелом енергії для теплонасосних технологій системи теплопостачання є використання енергії землі, що міститься у повітрі, ґрунті та воді. Тому необхідно розвивати енергоефективні екологічно чисті ГТН технології для систем теплопостачання типу «повітря–вода», «ґрунт–вода» і «вода–вода», що працюють з високими показниками ефективності і за опалювальний період заощаджують до 75% коштів у порівнянні із традиційними системами опалення [10–16].

Постановка проблеми. Застосування для теплопостачання традиційних джерел енергії потребує суттєвих фінансових затрат із скороченням запасів органічних видів палива та зростанням цін на енергоносії. Натепер на даному етапі необхідно впроваджувати сучасні ГТН з використанням поновлюваних альтернативних джерел енергії, які відкривають можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в довкілля. Проблема зниження затрат на теплопостачання актуальна нині і для підприємств морського транспорту [13–16].

Підвищення енергоефективності ГТН, які використовують геотермальну теплоту, в наш час є одним із найважливіших питань для подальшого розвитку та впровадження технологій застосування відновлювальних джерел

енергії в системах теплопостачання і також для підприємств морського транспорту [14–16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ГТН є одним з перспективних напрямків розвитку сучасної енергетики і знаходиться в центрі уваги зарубіжних і українських дослідників. В країнах Європи та Америки ГТН використовуються вже більше ніж 30 років для теплопостачання житлових і інших будівель та приміщень. Досвід таких країн, як США, Японія, Франція, Німеччина, Швеція, Фінляндія та інших доводить доцільність застосування ГТН [14–16].

ГТН – найбільш ефективне джерело альтернативної енергії, які працюють за принципом зворотнього циклу холодильної машини, передаючи тепло від низькотемпературного джерела до середовища з більш високою температурою, наприклад, системи опалення і гарячого водопостачання. Тепловий насос працює наступним чином. У теплообміннику-випарнику відбирається теплота низького потенціалу і передається так званому робочому тілу (холодоагенту). Утворені у випарнику пари холодоагента стискаються в компресорі і одночасно підвищуються їх тиск і температура. Потім теплота стиснутої пари у конденсаторі передається тепловому споживачу, а конденсат після дроселювання тиску знову надходить у випарник. Нині компресійні ГТН отримали найбільше використання для теплопостачання [14–17].

Проведення термодинамічного дослідження енергоефективності використання ГТН в системах теплопостачання на підприємствах морського транспорту та морських портах натеper є актуальним.

Методологією термодинамічного дослідження енергоефективності і впровадження ТН в системах теплопостачання на підприємствах морського транспорту та морських портах при використанні низькопотенційних джерел теплоти, наприклад, ґрунту, ґрунтових вод, повітря є застосування ексергетичного методу дослідження з визначенням коефіцієнта трансформації ГТН (COP) та ексергетичного ККД [15–21].

Формулювання цілей статті. Метою статті є оцінка термодинамічної ефективності ГТН при використанні їх на підприємствах морського транспорту та морських портах.

Виклад основного матеріалу. ГТН поділяють на: геотермальні ґрунтові «ґрунт-вода», водяні «вода-вода» та повітряні «повітря-вода», а також ГТН які використовують вторинну теплоту.

В ГТН з горизонтальним контуром система «ґрунт-вода» колектор розміщується кільцями або спіралями в горизонтальних траншеях нижче глибини промерзання ґрунту (зазвичай від 1,5 м і більше) з розрахунку: один метр труби еквівалентний 20–30 Вт. Цей спосіб є найбільш економічно ефективним для підприємств морського транспорту за умови відсутності дефіциту земельної площі під контур [18, 19].

В ГТН з вертикальним контуром система «ґрунт-вода» колектор розміщується спіралями або кільцями у водоймі (морі, озері, ставку, річці) нижче глибини промерзання. Цей варіант є ідеальним за всіма показниками: короткий контур, найбільш висока температура навколишнього середовища, як наслідок, висока ефективність роботи. Один метр труби підводного контуру дорівнює 30 Вт теплової

енергії. Труби заповнюються антифризом (розчин пропілен-гліколю). Це найбільш дешевий варіант, але є вимоги до мінімальної глибини і обсягу води у водоймі для конкретного регіону підприємств морського транспорту.

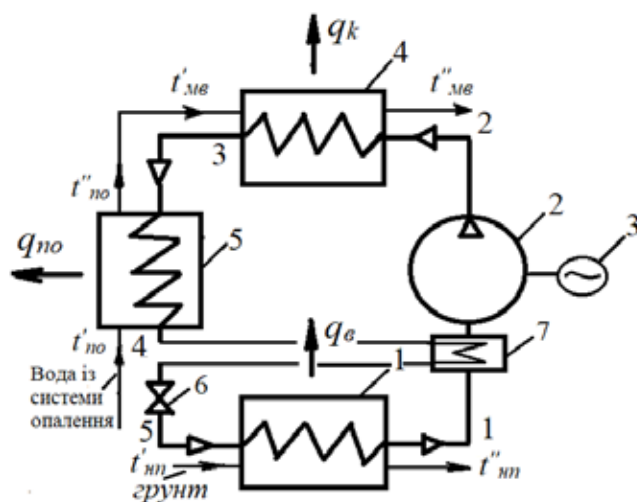
В ГТН з притопленим контуром система «вода-вода» ґрунтові води є кращим джерелом енергії, завдяки тому, що навіть в зимовий час температура цього ресурсу має додатні значення від +5 до +15 °С. ГТН, які отримують енергію від ґрунтових вод мають найбільш високий ККД [21].

Повітряні ГТН використовують як джерело низькопотенційної теплової енергії повітря. Джерелом теплоти є зовнішнє (атмосферне) повітря і витяжне вентиляційне повітря (загальнообмінної або місцевої) вентиляції будівель підприємств морського транспорту.

Повітряні ГТН не вимагають монтажу підземного чи підводного контуру – їх використовують в тому випадку, коли інші варіанти відбору теплоти не можуть бути реалізовані. Теплова енергія повітря використовується до позначки -15 °С. При сильних морозах застосовують додатковий теплогенератор, але ТН Heloitem мають робочий діапазон температур від -25 до +45 °С і додатковий теплогенератор не потрібний [22]. Існують також повітряні ТН, які відбирають низькопотенційну теплоту з повітря і використовують його для обігріву приміщень в будинку за допомогою повітряної каналної системи «повітря-повітря» [23].

Принципова схема ґрунтового геотермального парокомпресійного теплового насоса наведена на рис. 1.

Температурні рівні низькопотенційних джерел теплоти. Зовнішнє повітря +5...+10 °С, витяжна вентиляція +15...+25 °С, озерна вода 0...+10 °С, річкова вода 0...+10 °С, морська вода +3...+8 °С, ґрунт 0...+10 °С, ґрунтові води >10 °С, геотермальна вода +20...+50 °С [18].



1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун;

4 – конденсатор; 5 – охолоджувач; 6 – дросель; 7 – перегрівач

Рис. 1. Принципова схема геотермального парокомпресійного теплового насоса «ґрунт-вода» для системи теплостачання

Теплові навантаження в ГТН «грунт–вода» представлені на p – h діаграмі (рис. 2), де вони наведені у вигляді відповідних відрізків прямих ліній, що відображають основні термодинамічні процеси. Енергетичну ефективність ГТН «грунт–вода» оцінюємо за допомогою p – h діаграми (рис. 2).

Термодинамічний розрахунок циклу ГТН «грунт–вода» наступний [15–23].

Температура насиченої пари пропану на виході з випарника

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

Температура конденсації пропану в конденсаторі

$$T_K = T''_{мб} + \Delta T_K. \quad (2)$$

Ступінь стиснення робочого тіла пропану в компресорі

$$\varepsilon = P_K/P_B, \quad (3)$$

де $P_K = 2,5$ МПа, $P_B = 0,45$ МПа – тиск конденсації і випаровування пропану при температурах $T_K = 342$ К і $T_B = 275$ К.

Питома робота стиснення в компресорі

$$l_{ст} = h_2 - h_1. \quad (4)$$

Питоме теплове навантаження випарника

$$q_B = h_1 - h_5. \quad (5)$$

Питома теплова потужність конденсатора

$$q_K = h_2 - h_3. \quad (6)$$

Питоме теплове навантаження охолоджувача

$$q_{ii} = h_3 - h_4. \quad (7)$$

Правильність розрахунку визначається перевіркою теплового балансу

$$l_{ст} + q_B = q_K + q_{по}. \quad (8)$$

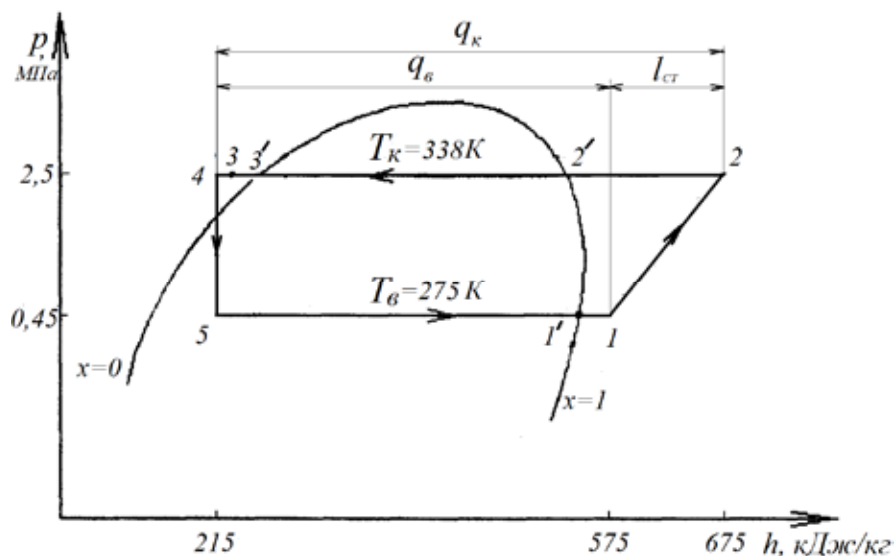


Рис. 2. Цикл ТН «грунт–вода» в p – h діаграмі

Питома витрата первинної енергії (електроенергії) ГТН на одиницю виробленої теплоти

$$E_{ТН} = l_{CT} / q_K. \quad (9)$$

Питома енергія, яка споживається електродвигуном

$$W = l_{CT} / \eta_{ем.} \cdot \eta_e, \quad (10)$$

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

Теоретичний коефіцієнт трансформації теплоти ідеального циклу Карно COP_T

$$COP_T = T_K / (T_K - T_B), \quad (11)$$

де T_B – абсолютна температура випаровування пропану у випарнику ТН, К; T_K – абсолютна температура конденсації пропану в конденсаторі ТН, К.

Коефіцієнт трансформації теплоти ГТН

$$COP = COP_T \cdot \eta_{ТН}, \quad (12)$$

де $\eta_{ТН}$ – коефіцієнт, який враховує реальні процеси, що здійснюються робочим тілом у ТН, який згідно з рядом джерел теплоти змінюється в діапазоні 0,6...0,8 (приймаємо $\eta_{ТН} = 0,6$) [15]; COP_T – теоретичний коефіцієнт трансформації ТН.

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

Ексергетичний ККД ТН «грунт–вода» показує ступінь термодинамічної досконалості ТН і розраховується як відношення відведеної від ТН ексергії до підведеної ексергії [24–27]

$$\eta_{ex} = e_{від.} / e_{під.}, \quad (13)$$

де $e_{від.} = e_B + e_{по}$ – сума відведеної від ТН ексергії; $e_{під.} = e_H + e_e$ – сума підведеної до ТН ексергії; e_B – питома ексергія, відведена середовищем, яке нагрівається від конденсатора ТН; $e_{по}$ – питома ексергія, відведена середовищем, яке нагрівається від охолоджувача; e_H – 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

$$e_B = \tau_B q_K, \quad (14)$$

де τ_B – ексергетична температура високопотенційного теплоносія

$$\tau_B = \frac{T_{ср.МВ}^K - (t_{н.с.} + 273)}{T_{ср.МВ}^K}. \quad (15)$$

Середня логарифмічна температура гарячого теплоносія

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

Ексергія отримана високопотенційним теплоносієм в охолоджувачі

$$e_{по} = \tau_{по} q_{по}, \quad (17)$$

де τ_B – ексергетична температура високопотенційного теплоносія в охолоджувачі

$$\tau_{no} = \frac{T_{cp}^{no} - (t_{н.с.} + 273)}{T_{cp}^{no}}. \quad (18)$$

Середня логарифмічна температура високопотенційного теплоносія в охолоджувачі

$$T_{cp}^{no} = \frac{t_{no}'' - t_{no}'}{\ln \frac{t_{no}'' + 273}{t_{no}' - 273}}. \quad (19)$$

Ексергія, віддана низькопотенційним теплоносієм у випарнику

$$e_n = \tau_n q_v, \quad (20)$$

де τ_n – ексергетична температура низькопотенційного теплоносія

$$\tau_n = \frac{T_{cp.нт.}^B - (t_{н.с.} + 273)}{T_{cp.нт.}^B}, \quad (21)$$

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

Середня логарифмічна температура низькопотенційного теплоносія

$$T_{cp.нт.}^B = \frac{t_{нт.}' - t_{нт.}''}{\ln \frac{t_{нт.}' + 273}{t_{нт.}'' - 273}}. \quad (22)$$

Ексергія електроенергії, що витрачається на привід компресора

$$e_c = W = \frac{l_{ст.}}{\eta_{с.м.} \eta_c}. \quad (23)$$

Результати проведеного вище термодинамічного розрахунку циклу ГТН «грунт–вода» наведені в табл. 1.

Наведений вище термодинамічний аналіз енергетичних і ексергетичних втрат дає тільки загальне уявлення про термодинамічну ефективність циклу ГТН

Таблиця 1

Термодинамічний розрахунок циклу ГТН «грунт–вода»

Параметр	Розмірність	Розрахункові значення
1	2	3
Температура випаровування пропану, T_B	К	275
Ентальпія пропану після випарника, h_1	кДж/кг	580
Тиск пропану у випарнику, P_B	МПа	0,45
Температура конденсації пропану, T_K	К	342
Ентальпія пропану після конденсатора, h_3	кДж/кг	225
Тиск конденсації пропану, P_K	МПа	2,5
Ентальпія пропану на вході в компресор, h_1	кДж/кг	575
Ентальпія пропану після компресора, h_2	кДж/кг	675
Ентальпія пропану перед випарником, h_5	кДж/кг	215

Продовження табл. 1

1	2	3
Питоме теплове навантаження випарника, q_v	кДж/кг	360
Питоме теплове навантаження конденсатора, q_k	кДж/к	450
Питоме теплове навантаження охолоджувача, $q_{по}$	кДж/кг	10
Питома робота стиснення в компресорі, $l_{ст}$	кДж/кг	100
Питома енергія, яка споживається електродвигуном, W	кДж/кг	131
Перевірка теплового балансу, $q_{тп}$	–	460
Коефіцієнт стиснення, ε	–	5,5
Коефіцієнт перетворення теплоти ТН, COP COP	–	5,1 3,5
Середня температура низькопотенційного теплоносія, $T_{ср.нт}^e$	К	279
Термодинамічна температура низькопотенційного теплоносія,	–	0,062
Ексергія, віддана низькопотенційним теплоносієм, e_n	кДж/кг	22,3
Середня температура високопотенційного теплоносія в конденсаторі, $T_{ср.мв}^k$	К	338
Термодинамічна температура високопотенційного теплоносія в конденсаторі, τ_v	–	0,155
Ексергія, одержана високопотенційним теплоносієм в конденсаторі, e_v	кДж/кг	69,75
Середня температура високопотенційного теплоносія в охолоджувачі, $T_{ср}^{no}$	К	303
Термодинамічна температура високопотенційного теплоносія в охолоджувачі, t	–	0,099
Ексергія, одержана високопотенційним теплоносієм в охолоджувачі, $e_{по}$	кДж/кг	0,99
Ексергія електроенергії, яка споживається, e_e	кДж/кг	131
Ексергетичний ККД ТН, η_{ex}	–	0,45

«грунт-вода», на підставі якого можна зробити висновок про внесок того, чи іншого елемента ГТН «грунт-вода» в ефективність перетворення потоків енергії.

Для прийняття практичних рішень щодо зменшення ексергетичних втрат в елементах ГТН «грунт-вода» необхідно мати інформацію про власні і технічні втрати ексергії в кожному з елементів.

Тому, необхідно продовжити дослідження в цьому напрямку, прийнявши за основу розглянутий вище приклад для ГТН «грунт-вода», який працює на холодильному агенті пропану і в подальшому використовувати найсучасніші природні екологічно чисті робочі тіла для теплового насоса і відновлювальні джерела енергії для трансформації теплової енергії.

Висновки. Впровадження ГТН є перспективним напрямком використання альтернативних джерел енергії для забезпечення потреб систем теплопостачання, вентиляції та гарячого водопостачання будівель підприємств морського транспорту, але даний процес суттєво залежить від місцезнаходження об'єкта

та наявності доступу до певного оптимального для нього джерела низькопотенціальної теплової енергії.

Проведено термодинамічне дослідження енергоефективності застосування ГТН «грунт-вода» для системи теплопостачання підприємств морського транспорту при використанні ґрунту, як джерел низькопотенційної теплової енергії.

З'ясовано, що енергетична ефективність ГТН «грунт-вода», робочим тілом якого є пропан, оцінена коефіцієнтом перетворення COP ГТН і становить 3,5.

Методом ексергетичного аналізу оцінено ексергетичний ККД ГТН в залежності від середньотермодинамічних температур випаровування T_{cp}^B , конденсації T_{cp}^K і охолодження T_{cp}^{no} пропану та показано, що досконалість перетворення енергії в ТН «грунт-вода» становить 45%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маляренко В.А., Лисак Л.В. Енергетика, довідка, енергозбереження. Х: Рубікон. 2004. 368 с.
2. Безродний М.К., Пуховий І.І., Кутра Д.С. Теплові насоси та їх використання. Навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ». 2013. 312 с.
3. Остапенко О.П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2015. 123 с.
4. Арсеньєв В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку. Навчальний посібник. Суми: СДУ. 2018. 364с.
5. Арсеньєв В.М. Теплонасосная технология энергозбереження. Суми: Вид-во СДУ. 2009. 251 с.
6. Босий М.В., Кузик О.В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022, P. 24-40. <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
7. Пісарев В.Є. Теплові насоси та холодильні установки. Навчальний посібник. К: КНУБА. 2002. 124с.
8. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання. Монографія. Під ред. акад. НАН України А.А. Долінського; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. К: 2008. 104 с.
9. Безродний М.К., Притула Н.О. Енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання. Монографія. К: НТУУ «КПІ». 2012. 208 с.
10. Шевель В.И. 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. 2004. С. 239–244.
11. Хмельнюк М.Г., Мартынюк М.О. Повышение эффективности установки низкотемпературной конденсации природного газа. Одесса: ОДАХ. Технические газы. № 4. 2008. С. 30–35.
12. Босий М.В., Кузик О.В. Ефективність циклу теплового насоса для теплопостачання. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні*

- науки. 2020. Вип. 3(34). С. 136–142. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>
13. Босий М.В. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса на ґрунтових водах. *Moderní aspekty vědy: XX. Díl mezinárodní kolektivní monografie. Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group „Vědecká perspektiva“*, 2022. str. 556–568. <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-20.pdf>
 14. Босий М.В. Теплові насоси – енергоефективне відновлювальне екологічне чисте джерело теплоти. *Moderní aspekty vědy: XXI Díl mezinárodní kolektivní monografie Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group “Vědecká perspektiva”*, 2022, P. 357–380. <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
 15. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса: Студия «Негоциант». 2006. 712 с.
 16. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія. Вінниця: ВНТУ. 2009. 176 с.
 17. Арсеньев В.М., Гречаненко В.А. Эксергетическая оценка эффективности теплонасосной технологии энергосбережений. *Вісник Сумського державного університету*. 2002. №9(42). С. 81–85.
 18. Босий М.В., Кропівний В.М., Кузик О.В., Кропівна А.В., Молокост Л.А Термодинамічна енергоефективність парокомпресійного теплового насоса на ґрунтових водах. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький. 2022, вип. 5(36), ч. I. С. 47–54. http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html
 19. Босий М.В., Кропівний В.М., Кузик О.В. Термодинамічне дослідження циклу теплового насосу «ґрунт-вода» для системи опалення приміщення. *Науковий журнал Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. Кременчук: №1(132), 2022. С. 165–172. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.22>. <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>
 20. Сірко З.С., Коренда В.А., Вишняков І.Ю., Протасов О.С., Охріменко С.М., Цірень Н.Л. Використання теплових насосів для опалення та гарячого водопостачання будівель підприємств на прикладі установок Helioterm. *Наукові доповіді НУБіП України. Техніка і енергетика АПК*. № 5 (87). 2020.
 21. Босий М.В. 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: Том 33 (72), № 4, 2022. С. 144–148. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>
 22. Босий М.В., Лисенко А.Я., Мануйлович В.В., Панішко О.В. Ефективність циклу геотермального теплового насосу. V Міжнародна

- науково-практична конференція «Актуальні питання сучасної науки, суспільства та освіти». The 5th International scientific and practical conference «Topical issues of modern science, society and education» (November 28–30, 2021) SPC «Sci-conf.com.ua», Kharkiv, Ukraine. 2021. 2101 p., с. 418–422. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>
23. Босий М.В., Лисенко А.Я., Мануйлович В.В., Баркар М.М. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса «вода-вода». The 3rd International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (December 5–7, 2021) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2021. 1036 p. ISBN 978-91-87224-02-7. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>
24. Босий М.В., Лисенко А.Я., Мануйлович А.В., Панішко О.В., Баркар М.М. Геотермальний тепловий насос «грунт-вода». The 2nd International scientific and practical conference – “Modern research in world science” (May 15–17, 2022) SPC – “Sci-conf.com.ua”, Lviv, Ukraine. 2022. P.406-413. ISBN 978-966-8219-86-3. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>
25. Босий М.В., Боса О.А., Лисенко А.Я., Мануйлович В.В., Бельченков Є.В., Шевченко О.А., Герасименко І.О. Термодинамічне дослідження циклу теплового насоса «грунт-вода». The 11th International scientific and practical conference “Eurasian scientific discussions” (November 21–23, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2022. p. 97–103. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-21-23.11.22.pdf>
26. Босий М.В., Боса О.А., Лисенко А.Я., Мануйлович А.В., Бельченков Є.В., Шевченко О.А., Герасименко І.О. Енергоефективність циклу теплового насоса «грунт-вода». The 1st International scientific and practical conference “Scientific research in the modern world” (November 9-11, 2022) Perfect Publishing, Toronto, Canada. 2022. p. 303–309. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-9-11.11.22.pdf>
27. Босий М.В., Боса О.А., Лисенко А.Я., Мануйлович А.В., Бельченков Є.В., Ботнаренко В.О., Авраменко Є.В. Тепловий насос «грунт-вода». The 3rd International scientific and practical conference “Science and technology: problems, prospects and innovations” (December 14–16, 2022) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2022. С. 163–168. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-14-16.12.22.pdf>

REFERENCIS

1. Malyarenko, V. A., & Lysak, L. V. (2004). Energy, environment, energy saving [Enerhetyka, dovkilliya, enerhozberezhennya]. X: Rubicon. 368 p. [in Ukrainian].
2. Bezrodnyi, M.K., Pukhovii, I.I., & Kutra, D.S. (2013). Heat pumps and their use [Teplovi nasosy ta yikh vykorystannya]. Tutorial. Kyiv: NTUU "KPI". 312 p. [in Ukrainian].
3. Ostapenko, O.P. (2015). Refrigeration equipment and technology. Heat pumps [Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiya. Teplovi nasosy]. Tutorial. Vinnytsia: VNTU. 123 p. [in Ukrainian].
4. Arsenyev, V.M., & Meleychuk, S.S. (2018). Heat pumps: basics of theory and calculation [Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku]. Tutorial. Sumy. SSU 364 p. [in Ukrainian].
5. Arsenyev, V.M. (2009). Heat pump energy saving technology [Teplonasosnaya tekhnolohyya enerhozberezhennya]. Sumy: Type of SDU. 251 p. [in Ukrainian].
6. Bosyi, M.V., & Kuzyk, O.V. (2022) Heat pumps for heating and hot water supply [Teplovi nasosy dlya opalennya ta haryachoho vodopostachannya]. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia: "Baltija Publishing". P. 24–40. [in Ukrainian]. <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
7. Pisarev, V.E. (2002). Heat pumps and refrigeration units [Teplovi nasosy ta kholodylni ustanovky]. Tutorial. K: KNUBA. 124 p. [in Ukrainian].
8. Snezhkin, Y.F., Chalayev, D.M., Shavrin, V.S., & Dabyzha, N.O. (2008). Heat pumps in heating and cooling systems [Teplovi nasosy v systemakh teplokhodopostachannya]. Monograph. Sub. ed. Acad. NAS of Ukraine A.A. Dolinskyi; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Technology thermophysics. K: 104p. [in Ukrainian].
9. Bezrodnyi, M.K., & Prytula, N.O. (2012). Energy efficiency of heat pump heat supply schemes [Enerhetychna efektyvnist teplonasos-nykh skhem tep-lopustachannya]. Monograph. K: NTUU "KPI". 208 p. [in Ukrainian].
10. Shevel, V. I. (2004). Operation of series compressors for propane-butane oil in the heat pump mode [Rabota kompressorov seryynoho yspolnenyya na smecy propan–butan v teplonasosnom rezhyme raboty]. Compressor technology and pneumatics in the 21st century: 13th International Scientific and Technical Conference on Compressor Construction. Sumy: Sumy State University. P. 239–244. [in Ukrainian].
11. Khmelnyuk, M.G., & Martynyuk, M.O. (2008). Increasing the efficiency of a low-temperature natural gas condensation plant [Povyshenye éffektyvnosti ustanovky nyzkotemperaturnoy kondensatsyy pryrodnoho haza]. Odessa: ODAH. Technical gases. No. 4. P. 30–35. [in Ukrainian].
12. Bosyi, M.V., & Kuzyk, O.V. (2020). Efficiency of the heat pump cycle for heat supply [Efektyvnist tsykladu teplovoho nasosa dlya teplopustachannya]. Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences. Issue

- 3(34). P. 136–142. [in Ukrainian]. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>
13. Bosyi, M.V. (2022). Thermodynamic energy efficiency of a geothermal heat pump on groundwater [Termodynamichna enerhoefektyvnist heothermalnogo teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh]. Modern aspects of science: XX. Díl international kolektivní monografie. International Economic Institute s.r.o. Česká republika: Publishing Group "Vědecká perspektiva". str. 556–568. [in Ukrainian]. <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-20.pdf>
14. Bosyi, M.V. (2022). Heat pumps – an energy-efficient regenerative ecologically clean source of heat [Teplovi nasosy – enerhoefektyvne vid-novlyuvalne ekolohi-čne chyste dzherelo teploty]. Moderní aspekty védy: XXÍ Díl international kolektivní monografie International Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group "Vědecká perspektiva". P. 357–380. [in Ukrainian]. <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
15. Morozyuk, T.V. (2006). Theory of refrigeration machines and heat pumps [Teoryya kholodylnykh mashyn y teplovykh nasosov]. Odessa: Studio "Negotiant". 712 p. [in Ukrainian].
16. Tkachenko, S.Y., & Ostapenko, O.P. Steam compression heat pump installations in heat supply systems [Parokompresiyini teplonasosni ustanovky v systemakh teplopostachannya]. Monograph. Vinnytsia: VNTU. 2009. 176 p. [in Ukrainian].
17. Arsen'ev, V.M., & Grechanenko, V.A. (2002). Exergetic evaluation of the efficiency of heat pump technology energy-saving [Ékserhetycheskaya otsenka éffektyvnosti teplonasosnoy tekhnolohyy énerhosberezheny]. Bulletin of Sumy State University. No. 9(42). P. 81–85. [in Ukrainian].
18. Bosiy, M.V., Kropivny, V.M., Kuzyk, O.V., Kropivna, A.V., & Molokost, L.A. Thermodynamic energy efficiency of a vapor compression heat pump on groundwater [Termodynamichna enerhoefektyvnist parokompresiynoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh]. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences. Kropyvnytskyi. 2022, issue 5(36), part I. S. 47–54. [in Ukrainian]. http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html
19. Bosyi, M.V., Kropivny, V.M., & Kuzyk, O.V. (2022). Thermodynamic study of the soil-water heat pump cycle for the space heating system [Termodynamichne doslidzhennya tsykladu teplovoho nasosu «hrunt-voda» dlya systemy opalennya prymishchennya]. Scientific journal Visnyk of the Kremenchug National University named after M. Ostrogradskyi. Kremenchuk: No. 1(132). P. 165–172. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.22>. <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>
20. Sirko, Z.S., Korenda, V.A., Vyshnyakov, I.Yu., Protasov, O.S., Okhrimenko, S.M., & Tsieren, N.L. (2020). The use of heat pumps for heating and hot water supply of enterprise buildings on the example of Heliotherm installations [Vykorystannya teplovykh nasosiv dlya opalennya ta haryachoho vodopostachannya budivel pidpryyemstv na prykladi

- ustanovok Helioterm]. Scientific reports of NUBiP of Ukraine. Technology and energy of agricultural industry. No. 5(87). [in Ukrainian].
21. Bosyi, M.V. (2022). The energy efficiency of an air heat pump based on an ecologically clean working medium of propane [Enerhetychna efektyvnist povitryanoho teplovoho nasosa na ekolohichno chystomu robochomu tili propani]. Scientific journal "Scientific notes of V.I. Tavrii National University". Vernadsky". Series: Technical sciences". Kyiv: Volume 33(72), No. 4. P. 144–148. [in Ukrainian]. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>
 22. Bosyi, M.V. Lysenko, A.Ya., Manuylovich, V.V., & Panishko, O.V. (2021). Efficiency of the geothermal heat pump cycle [Efektyvnist tsykladu heotermalnoho teplovoho nasosu]. 5th International scientific and practical conference "Actual issues of modern science, society and education". The 5th International scientific and practical conference "Topical issues of modern science, society and education" (November 28–30) SPC "Sci-conf.com.ua", Kharkiv, Ukraine. 2101 p., p. 418–422. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>
 23. Bosyi, M.V. Lysenko, A.Ya., Manuylovich, V.V., & Barkar, M.M. (2021). Thermodynamic energy efficiency of geothermal heat pump "water-water" [Termodynamichna enerhoefektyvnist heotermalnoho teplovoho nasosa «voda-voda»]. The 3rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5–7, 2021) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 1036 p. ISBN 978-91-87224-02-7 [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>
 24. Bosyi, M.V., Lysenko, A.Ya., Manuylovich, A.V., Panishko, O.V., & Barkar, M.M. (2022). Ground-water geothermal heat pump [Heotermalnyi teplovyi nasos «hrunt-voda»]. The 2nd International scientific and practical conference "Modern research in world science" (May 15–17 2022). SPC "Sci-conf.com.ua", Lviv, Ukraine. P.406-413. ISBN 978-966-8219-86-3 [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>
 25. Bosyi, M.V., Bosa, O.A., Lysenko, A.Ya., Manuylovich, V.V., Belchenkov, E.V., Shevchenko, O.A., Gerasimenko, I.O. (2022). Thermodynamic study of the soil-water heat pump cycle [Termodynamichne doslidzhennia tsykladu teplovoho nasosa «hrunt-voda»]. The 11th International scientific and practical conference "Eurasian scientific discussions" (November 21-23, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. p. 97–103. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-21-23.11.22.pdf>

26. Bosiy, M.V., Bosa, O.A., Lysenko, A.Ya., Manuylovich, A.V., Belchenkov, E.V., Shevchenko, O.A., Gerasimenko, I.O. (2022). Energyefficiency of the heat pump cycle "ground- water" [Enerhoefektyvnist tsykladu teplovoho nasosa «hrunt-voda»]. The 1st International scientific and practical conference "Scientific research in the modern world" (November 9–11) Perfect Publishing, Toronto, Canada. p. 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>
27. Bosyi, M.V., Bosa, O.A., Lysenko, A.Ya., Manuylovich, A.V., Belchenkov, E.V., Botnarenko, V.O., Avramenko, E.V. (2022). Heat pump "soil-water" [Teplovyi nasos «hrunt-voda»]. The 3rd International scientific and practical conference "Science and technology: problems, prospects and innovations" (December 14–16) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. P. 163–168. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-14-16.12.22.pdf>