

М.О. Куницький

Національний університет водного господарства та природокористування, Україна

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЕКОНОМІЧНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В МІСЬКІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ

Використання теплових насосів дозволяє заощаджувати та сприяє економії витрат на підігрів води. Перетворення первинної енергії на електростанціях здійснюється з урахуванням коефіцієнту корисної дії, що показує кількість використання первинної енергії для електричних теплових насосів та коефіцієнт перетворення енергії. Для підігріву води враховується потужність теплового насосу при виборі.

Ключові слова: тепловий насос, економічна оцінка, підігрів води, гаряче водопостачання, тепла енергія, теплосмість, стічні води, енергетичний потенціал.

Постановка проблеми

Використання теплових насосів, як основного обладнання для підігріву води, можна застосувати для першого ступеня підігріву води, адже це потребує меншого використання енергії. Підігрів води в години її максимального використання тепловою мережею чи автономним обладнанням враховуються при виборі теплового насосу за потужністю. Для утилізації тепла на невеликих ділянках колекторів може слугувати теплообмінник.

У випадку використання для підігріву води електричного бойлера, враховується коефіцієнти корисної дії електростанції та системи енергопостачання. А у випадку використання газових котлів для підігріву води варто враховувати збільшення витрат. Урахування первинної енергії, яка потрібні для електричних бойлерів та теплових насосів, здійснюється на атомних електростанціях.

Для забезпечення гарячого водопостачання з використанням генераторів теплової енергії постає задача, спираючись на розрахункові дані, підбирати тепловий насос з оптимальними характеристиками та здійснити його оцінку щодо використання в міській інфраструктурі.

Аналіз останніх досліджень у публікаціях

У вартість теплового насосу закладають капітальні та експлуатаційні витрати та рахують термін окупності. Альтернативою для теплового насосу постають котли на природному газі та електричний бойлер, що також враховують витрати на накопичувальний підігрів води. Витрати на підключення до централізованої мережі гарячого водопостачання та вартість котла чи бойлера не враховуються.

Перетворення первинної енергії на електростанціях здійснюється з урахуванням коефіцієнту корисної дії (ККД), що надає оцінку використання первинної енергії для електричних теплових насосів та коефіцієнт перетворення енергії (КПЕ або COP - Coefficient of Performance). COP – відношення кількості тепла переданого для гарячого теплоносія до витрати електроенергії витраченої компресором.

Сучасні дослідження щодо ефективності використання теплових насосів та оцінка їх економічної доцільності дають змогу безперерійно отримувати теплоносії з стоків.

Відомо, що вирішення такого питання традиційно пов'язують із можливістю модифікування реакційної акрилової системи відповідними домішками [1]:

- пасивними (нереакціоспроможними) модифікаторами;
- реакційноздатними домішками;
- запровадженням допустимої кількості наповнювачів;
- структуруючими компонентами, шляхом повної заміни або зміни їх співвідношення в реакційній акриловій клейовій композиції.

Це особливо актуально у питаннях адаптації до можливих відхилень від рекомендованої технології проведення робіт, а також екстремальних (аварійних) ситуацій, що виникають безпосередньо під час їх виконання. Ефективність застосування зазначених способів модифікування безпосередньо пов'язана з наявністю високоякісних матеріалів із однорідними властивостями [2].

Відомо, що композити з урахуванням органічних сполучних характеризуються високої інтенсивністю набору міцності. Традиційно в роботах обмежувалися визначенням міцнісних характеристик (руйнівної напруги при стисканні,

згинанні та ін.) через однакові для різних температур затвердіння (структурування) відрізки часу; пізніше було знайдено аналітичні висловлювання, що описують зміну міцності композитів у широкому проміжку часу. Було встановлено, що використовуються для органічних композитів (на основі поліефірних смол, фурфурол-ацетонного мономеру, метилметакрилату та ін) аналітичні вирази мають приватний характер і не враховують специфіку процесу міцності композитами на основі інших сполучних.

Ефективне застосування полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), у тому числі і на основі метилметакрилату (ММА), для ремонтно-відновлювальних робіт на різних об'єктах транспортної інфраструктури можливе лише за умови їхнього швидкого затвердіння без підведення тепла ззовні [3].

Для виконання цієї вимоги для ПКМ на основі ММА у загальному випадку можуть бути використані бінарні окисно-відновні системи, ініціюючі вільно-радикальні процеси, які включають власне ініціатор полімеризації (перекису, гідроперекису тощо) та прискорювач розпаду ініціатора (третинні аміни, поліетиленполіамін та ін) [4]. Найбільш широке застосування знайшла система пероксид бензоїлу (ПБ) – N,N-диметиланілін (ДМА), взаємодія між якими призводить до утворенню бензоатного радикалу, що ініціює полімеризацію.

Конструктивні умови таких систем включають необхідний теплообмін, передбачувані рівні в резервуарах, що зберігають тепловіддачу між накопиченою водою та навколишнім середовищем. Рівень ізоляції системи тепла чи холоду, що зберігаються в системах може бути стабільними. Механічні теплові насоси - це пристрої, що складаються з двох ТО, компресора та розширювального клапана. Вони засновані на циклі Карно, де ентропія стисненого газу або холодоагенту вища, що спричиняє підвищення температури. Коли холодоагент стісняється від тепла, рідина (вода для нагріву) може замінювати тепло всередині ТО, щоб знизити температуру холодоагенту, а потім холодоагент розширюється, викликаючи подальше зниження температури рідини. Холодний холодоагент може обмінюватися теплом із джерелами тепла (СВ чи іншим видом вторинного тепла), щоб нагрітися до того, як він знову стиснеться та закінчити термодинамічний цикл [5-8].

Формулювання мети статті

Оптимальне забезпечення гарячого водопостачання шляхом утилізації тепла стічних

вод можливе при постійному водоспоживанні та мінімальному потенціалі тепла стічних вод.

В дослідженні постає пошук економічно привабливого проекту зі швидким періодом окупності та низькою вартістю з забезпеченням гарячого водопостачання. Подальший розрахунок проекту повинен пропонувати фінансову привабливість та практичне використання для існуючих ОСББ й котельень.

Виклад основного матеріалу

Об'єктом дослідження у роботі є гуртожитки № 7 та 8 Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне. У якості базового економічного коефіцієнту було обрано існуючу систему гарячого водопостачання та її вартість для споживачів.

Згідно європейських рекомендацій в процесі реалізації проекту, добовий розрахунок споживання гарячої води на 1-го споживача на добу – 40 л. Основний час водоспоживання з 6:00 ранку до 24:00 вечора. Активність добового водовикористання можна прийняти 18 год/добу, а середнє використання гарячої води 3,11 м³/год. Загальний тепловий потенціал стічних вод розраховуватиметься для активного водовикористання 18 годин на добу.

Розглядається техніко-економічне порівняння систем гарячого водопостачання прикладі гуртожитків № 7 та № 8 НУВГП:

- традиційного від централізованого гарячого водопостачання;
- за допомогою теплових насосів, які використовують тепло ґрунту;
- за допомогою теплових насосів, які використовують тепло стічних вод.

Відповідно до ДБН.2.5-64:2012 середньодобові витрати води в гуртожитках № 7 та 8 будуть відповідати для двох типів мешканців:

- з загальними душовими, де загальна витрата води становить $q_f = 90$ л/добу, відповідно гарячої та холодної води: $q_r = 50$ л/добу та $q_x = 40$ л/добу;
- з душовими при всіх житлових кімнатах блоку малосімейних квартир, де загальна витрата води становить $q_f = 140$ л/добу, відповідно гарячої та холодної води: $q_r = 80$ л/добу та $q_x = 60$ л/добу.

Кількість проживаючих в гуртожитках № 7 та 8 станом на 2020 рік становить 1013 мешканці: 608 чол. з загальною нормою витрати води 90 л/добу та 405 чол. з загальною нормою витрати води 140 л/добу відповідно. Варто відзначити, що в кожному з гуртожитків проживає певна кількість мешканців одного з типів, що вказані вище.

Таблиця 1

Приклади обладнання для підігріву води

| Обладнання | Марка | COP | Режим, Вт | Потужність, кВт | Вартість, грн. |
|------------------------------|--|------|-----------|-----------------|----------------|
| Тепловий насос «вода - вода» | Gebwell G85 | 3,7 | 400 | 88,2 | 780 000 |
| Електричний бойлер | Титан | 0,96 | 390 | 60 | 353 778 |
| Газовий котел | Vaillant eco TEC plus VU OE 1006 / 5-5 | 1,09 | 60 | 97 | 191 900 |

Враховується кількість енергетичних ресурсів, які потрібно для підігріву води протягом року з добовим використанням 56 м³. Розрахована вартість залежить від ККД генератора теплової енергії та ціни. Основним видом палива є природний газ, в той час як для роботи теплового насоса та електричного бойлера потребується електрична енергія.

Враховуючи ціни на енергетичні ресурси, актуальні на 2021 рік, розглядаються витрати на паливно-енергетичні ресурси та вартість устаткування для підігріву води в таблиці 2.

Таблиця 2

Вартість устаткування для підігріву води та тарифи

| Показники | Газовий котел | Тепловий насос | Електричний бойлер |
|--------------------------------------|-------------------------|--|--------------------|
| ККД/COP | 1,09 | 3,7 | 0,96 |
| Ціна одиниці енергоносія на 2021 рік | 7,99 грн/м ³ | Денний тариф: 1,68 грн./кВт·год Нічний тариф: 0,84 грн./кВт·год | |
| Вартість устаткування, грн. | 191 900 | 780 000 | 353 778 |

В першому варіанті використовуються існуючі елементи системи ГАРЯЧЕ ВОДОПОСТАЧАННЯ: теплотрасу від ЦТП та від котельні по вул. Карнаухова, 41.

В другому варіанті проектується, будуються та монтуються такі елементи системи гарячого водопостачання: вертикальні зонди (стічні води свердловини), тепловий насос, баки-акумулятори, циркуляційні насоси та трубопроводи.

В третьому проектується, будуються та монтуються такі елементи системи гарячого водопостачання: труба теплообмінник, тепловий насос, баки-акумулятори, трубопроводи.

В розрахунки порівняльної економічної ефективності включають затрати на поточний ремонт та інші витрати. Крім того, загальним елементом систем, що порівнюються, є існуюча

система гарячого водопостачання. Тариф на активну електроенергію прийнято 1,68 грн./кВт·год станом на 2021 р. згідно даних Рівнеобленерго. Кількість робочих днів на рік - 365.

Максимально заявлена потужність споживання електроенергії – 32 кВт. Річна кількість електроенергії, що споживається, - 280 320 кВт·год.

Варіант № 1

Витрати на гаряче водопостачання

Вартість послуг з централізованим гарячим водопостачанням, що споживається, складає 83,87 грн вартість 1 м³ гарячої води (тариф 2021 р. для населення), грн.

Капітальні витрати: 0 грн.

Варіант № 2

Витрати на гаряче водопостачання

Вартість послуг гарячого водопостачання з використанням теплового насоса та тепла стічної води із свердловин складає 55,10 грн/м³.

Таблиця 3

Техніко-економічних показники для варіанту № 2

| Техніко-економічні показники | Одиниці вимірювання | Значення ТЕП |
|--|---------------------|--------------|
| Теплова потужність системи гарячого водопостачання | кВт | 1 212 688 |
| Річні витрати гарячої води | м ³ | 2 045 825 |
| Річні витрати електричної енергії | кВт*год | 280 320 |
| Орієнтовна вартість будівництва | грн. | 1 756 956 |
| Розрахунковий період окупності | роки | 4,2 |

Варіант № 3

Вартість послуг гарячого водопостачання з використанням теплового насоса теплообмінника на трубі колектора складає 50,11 грн/м³.

Таблиця 4
Техніко-економічних показники для варіанту № 3

| Техніко-економічні показники | Одиниці вимірювання | Значення ТЕП |
|--|---------------------|--------------|
| Теплова потужність системи гарячого водопостачання | кВт | 1 212 688 |
| Річні витрати гарячої води | м ³ | 2 045 825 |
| Річні витрати електричної енергії | кВт*год | 280 320 |
| Орієнтовна вартість будівництва | грн. | 1 210 880 |
| Розрахунковий період окупності | роки | 2,2 |

Варіант оптимізації проекту теплового насосного обладнання

Вартість послуг гарячого водопостачання з використанням теплового насоса теплообмінника на трубі колектора та тепла стічної води свердловин складає 54,02 грн/м³.

Таблиця 5
Техніко-економічних показники варіанту

| Техніко-економічні показники | Одиниці вимірювання | Значення ТЕП |
|--|---------------------|--------------|
| Теплова потужність системи гарячого водопостачання | кВт | 1 212 688 |
| Річні витрати гарячої води | м ³ | 2 045 825 |
| Річні витрати електричної енергії | кВт*год | 280 320 |
| Орієнтовна вартість будівництва | грн. | 1 589 820 |
| Розрахунковий період окупності | роки | 3,2 |

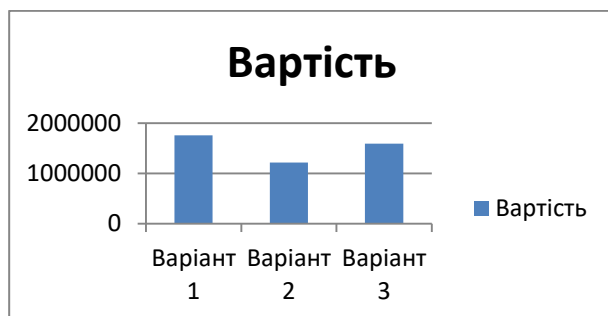


Рис.1. Гістограма вартості проектів

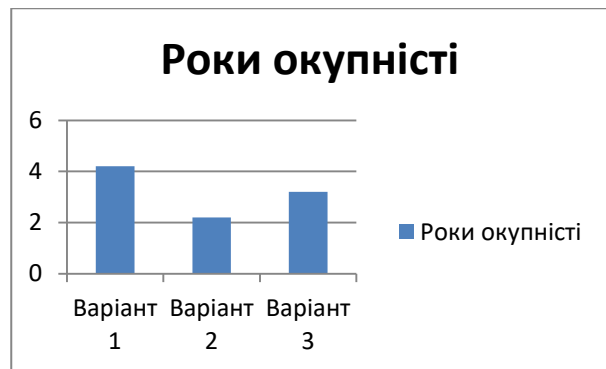


Рис.2. Гістограма періоду окупності проектів

Висновки

Було запропоновано поєднання техніко-економічних варіантів обладнання № 2 та 3 (що розглянуті вище), з метою впровадження безперебійної системи гарячого водопостачання, зменшення навантаження на комунікації в години максимального водовідбору та розподілу навантаження на систему протягом доби. Варто враховувати нічний тариф на електроенергію (0,45 грн./кВт*год), що суттєво зменшить витрати на електроенергію.

В роботі розглядається техніко-економічне порівняння систем гарячого водопостачання:

- традиційного від централізованого гарячого водопостачання;
- за допомогою теплового насоса, який використовує тепло ґрунту та стічної води.

Література

- Meggers, F., & Leibundgut, H. (2011). The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Buildings*, 43, p. 897–886. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.008>.
- Nicholas, H., Konstantinos, N., Rohinton, E., Bjorn, A., & Paul, Y. (2014) A renewable heat solution for water ingress in the Glasgow subway tunnel system. Conference: *Energy and sustainability*. <https://doi.org/10.2495/ESUS140141>.
- Hytiris, N., Ninikas, K., Emmanuel, R., Aaen, B., & Younger, P.L. (2018). A heat energy recovery system from tunnel wastewater. *Environmental Geotechnics* 5(5), 300–308. <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00087>.
- Postriotti, L., Baldinelli, G., Bianchi, F., Buitoni, G., Maria, F.D., & Asdrubali, F. (2016). An experimental setup for the analysis of an energy recovery system from wastewater for heat pumps in civil buildings. *Applied Thermal Engineering*. 102, Pp. 961-971. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.016>.
- Dürrenmatt, D.J. (2006). Berechnung des Verlaufs der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr. Master's Thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:12981>
- Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2008). Simulation of the wastewater temperature in sewers with TEMPEST. *Water Science & Technology*, 57(11), 1809-1815. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.291>.
- Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2012). TEMPEST Computer Program for the Simulation of the Wastewater Temperature in Sewers, Version 1.02, User Manual. <https://www.eawag.ch/en/departement/eng/software/>

8. Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2014). A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*, 48, 548-558. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.017>.

References

1. Meggers, F., & Leibundgut, H. (2011). The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Buildings*, 43, p. 897–886. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.008>.
2. Nicholas, H., Konstantinos, N., Rohinton, E., Bjorn, A., & Paul, Y. (2014) A renewable heat solution for water ingress in the Glasgow subway tunnel system. Conference: Energy and sustainability. <https://doi.org/10.2495/ESUS140141>.
3. Hytiris, N., Ninikas, K., Emmanuel, R., Aaen, B., & Younger, P.L. (2018). A heat energy recovery system from tunnel wastewater. *Environmental Geotechnics*, 5(5), 300–308. <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00087>.
4. Postrioti, L., Baldinelli, G., Bianchi, F., Buitoni, G., Maria, F.D., & Asdrubali, F. (2016). An experimental setup for the analysis of an energy recovery system from wastewater for heat pumps in civil buildings. *Applied Thermal Engineering*, 102, Pp. 961-971. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.016>.
5. Dürrenmatt, D.J. (2006). Berechnung des Verlaufs der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr. Master's Thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:12981>

6. Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2008). Simulation of the wastewater temperature in sewers with TEMPEST. *Water Science & Technology*, 57(11), 1809-1815. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.291>.
7. Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2012). TEMPEST Computer Program for the Simulation of the Wastewater Temperature in Sewers, Version 1.02, User Manual. <https://www.eawag.ch/en/department/eng/software/>
8. Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2014). A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*, 48, 548-558. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.017>.

Рецензент: доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій А.П. Сафоник, Національний університет водного господарства та природокористування, Україна.

Автор: КУНИЦЬКИЙ Михайло Олегович спеціаліст, молодший науковий співробітник науково-дослідної частини Національний університет водного господарства та природокористування
E-mail - m.o.kunyskiy@nuwm.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1700-8167>

THEORETICAL BASIS OF THE ECONOMIC ATTRACTIVENESS OF USING HEAT PUMPS IN CITY INFRASTRUCTURE

M. Kunyskiy

National University of Water Management and Nature Management, Ukraine

The use of heat pumps, as the main equipment for heating water, can be used for the first stage of water heating, since it requires less energy use. Water heating in the year of its maximum use by the heating network or autonomous equipment is taken into account when choosing a heat pump by capacity. A heat exchanger can be used to dispose of heat in small areas of the collectors. In the research, the search for an economically attractive project with a quick payback period and low cost with the provision of hot water supply appears. Further calculation of the project should offer financial attractiveness and practical use for existing condominiums and boiler houses. The object of research in the work is dormitories No. 7 and 8 of the National University of Water Management and Nature Management, Rivne. The existing hot water supply system and its cost to consumers were chosen as the basic economic coefficient. Capital and operating costs are included in the cost of the heat pump and the payback period is calculated. Alternatives to the heat pump are natural gas boilers and an electric boiler, which also take into account the costs of accumulative water heating. The costs of connecting to a centralized hot water supply network and the cost of a boiler or water heater are not taken into account. It is known that composites with organic binders are characterized by a high intensity of strength gain. Traditionally, the works were limited to the determination of strength characteristics (destructive stress during compression, bending, etc.) due to the same time segments of hardening (structuring) for different temperatures; later, analytical expressions describing the change in the strength of composites over a wide period of time were found. It was established that the analytical expressions used for organic composites (based on polyester resins, furfural-acetone monomer, methyl methacrylate, etc.) have a private nature and do not take into account the specifics of the strength process of composites based on other binders. In the first option, the existing elements of the HOT WATER SUPPLY system are used: the heating line from the CTP and from the boiler house along the street. Karnaukhova, 41. In the second option, the following elements of the hot water supply system are designed, built and installed: vertical probes (wastewater wells), heat pump, accumulator tanks, circulation pumps and pipelines. In the third, elements of the hot water supply system are designed, built and installed: heat exchanger pipe, heat pump, accumulator tanks, pipelines. The paper considers a technical and economic comparison of hot water supply systems: - traditional from centralized hot water supply; - with the help of a heat pump, which uses the heat of the soil and waste water.

Keywords: heat pump, economic attractiveness, water heating, domestic hot water, thermal energy, heat capacity, waste water, energy potential.