

1. Пархоменко Т.В. Звіт за результатами інженерно-геологічних вишукувань розробки протизсувних заходів на схилах Ботанічного саду ім. Гришка М.М. – К.: Проектний інститут "Укрспецтунельпроект", 2005. – Т. 187, 177.

2. Марчук Ю.М. Отчет по изучению современных экзогенных процессов на территории центральной и

северной области УССР. – К.: Киевская геологическая экспедиция, 1975. – 289 с.

3. Ситников А.Б. Гидрогеологическая станция "Феофания": многолетние исследования и результаты / А.Б. Ситников, Ю.Г. Головченко, К.Д. Ткаченко. – Киев: Институт геологических наук НАНУ, 2003. – 199 с.

УДК 621.577.2

О.В.Лисак (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ),

Є.О.Кулінко (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ)

Перспективи використання відкритих поверхневих водойм для теплопостачання за допомогою теплових насосів

У статті оцінено перспективи використання відкритих поверхневих водойм (ВПВ) у якості джерела теплової енергії для теплового насоса (ТН). Проаналізовано особливості ВПВ у якості джерела теплової енергії, розглянуто принципи схеми ТН, що використовують ВПВ, та наведено приклади їх впровадження як за кордоном, так і в Україні. Для демонстрації переваг використання ВПВ в якості джерела теплової енергії в порівнянні з повітрям було виконано розрахунки значень коефіцієнта трансформації ТН.

Ключові слова: теплові насоси, теплові насоси типу "вода-вода".

В статье выполнена оценка перспектив использования открытых поверхностных водоёмов (ОПВ) в качестве источника тепловой энергии для теплового насоса (ТН). Проанализированы особенности ОПВ в качестве источника тепловой энергии, рассмотрены принципиальные схемы ТН, использующих ОПВ, и приведены примеры их внедрения как за рубежом, так и в Украине. Для демонстрации преимуществ использования ОПВ в качестве источника тепловой энергии в сравнении с воздухом были выполнены расчёты значений коэффициента трансформации ТН.

Ключевые слова: тепловые насосы, тепловые насосы типа "вода-вода".

Вступ. Сьогодні все більшого поширення набуває використання теплових насосів (ТН) для забезпечення потреб теплопостачання¹. Цьому особливо сприяє сучасна тенденція до енергозбереження та екологічності.

Принцип енергозбереження при застосуванні ТН полягає в тому, що згідно теоретичного циклу їх роботи вони генерують більше теплової енергії, ніж споживають. Хоча фактичні значення коефіцієнта перетворення спожитої електричної енергії на теплову (COP²) є меншими за теоретичні внаслідок певних втрат, безпосереднє спалювання вугілля чи газу або пряме використання електроенергії буде менш ефективним (потребуватиме більшої первинної потужності), ніж застосування ТН для генерування тієї ж кількості теплової енергії.

Щодо екологічності, то виділяють дві основні переваги ТН.

По-перше, на відміну від газових та вугільних теплогенеруючих установок при застосуванні ТН відсутні продукти спалювання і, відповідно, не забруднюється навколишнє середовище в місці розташування ТН.

По-друге, якщо електроенергія, необхідна для роботи ТН, буде генеруватися шляхом спалювання вугілля чи газу на електростанціях, кількість продуктів спалювання буде меншою, ніж за прямого застосування вугільних та газових теплогенеруючих установок. Продукти спалювання внаслідок їх складу не тільки небезпечні для здоров'я людини, але й містять парникові гази, викиди яких пов'язують із глобальним потеплінням.

¹В цій роботі розглядаються лише пароконпресійні ТН, які використовуються виключно для генерації теплової енергії. Робота даних ТН в режимі холодильної машини не розглядається.

²COP (англ.) – coefficient of performance: коефіцієнт перетворення; коефіцієнт трансформації.

Ефективність роботи ТН у значній мірі залежить від використовуваного ним джерела теплової енергії. В Україні в якості джерел теплової енергії для ТН переважно використовують ґрунт³, ґрунтові води, повітря, стічні води промислових підприємств [1]. Водночас значно менша увага приділяється таким джерелам, як відкриті поверхневі водойми (ВПВ) [2]. Також є й інший термін для їх позначення – поверхневі води [1].

Метою роботи є визначення доцільності використання ВПВ в якості джерела теплової енергії. Для цього проаналізовано особливості ВПВ в якості джерела теплової енергії, розглянуто принципові схеми ТН, що використовують ВПВ, наведено приклади їх впровадження як за кордоном, так і в Україні. Також на прикладі значень COP продемонстрована перевага ТН, що використовують ВПВ замість повітря.

1. **Термінологія.** Терміном "ВПВ" в [2] позначали річки, озера та моря. Але цей список може бути й ширшим. Наприклад, у [3] в якості об'єктів для джерел теплової енергії також вказувались канали, естуарії⁴ та прибережні води.

Привертає увагу використання різних термінів для позначення морських ресурсів: "морська вода" та "прибережна вода". Запропонований у [3] термін "прибережні води" є більш точним, ніж термін "морська вода", оскільки більшість потенційних користувачів ТН мешкають у прибережній смузі, і тому вивченню в якості джерела теплової енергії в першу чергу підлягають саме прибережні води.

Об'єднання різних типів ВПВ для аналізу має сенс, оскільки методи їх використання для генерації теплової енергії за допомогою ТН є схожими.

Окрім того, ВПВ відносяться до гідротермальних ресурсів у тому значенні, що це є водні ресурси, придатні для виробництва теплової енергії. В цій статті термін "гідротермальні ресурси" використовуватись не буде для уникнення плутанини з іншими гідротермальними ресурсами, такими як ґрунтові

та стічні води.

Схожа проблема виникає при виборі терміну для ТН, які використовують ВПВ. В україномовній технічній літературі склалась традиція характеризувати такі теплові насоси не за типом джерела теплоти, а за типом теплоносія джерела теплоти – а саме води, яка може бути як з ВПВ, так і стічною чи ґрунтовою водою. Окрім того, до назви типу ТН додають назву теплоносія, що використовується в системі теплопостачання [1]. В англійській технічній літературі для позначення ТН, що використовують ВПВ, прийнято досить стійкий термін: "surface water heat pump" [4].

2. Характеристики ВПВ.

2.1. Переваги та недоліки ВПВ у порівнянні з іншими джерелами теплової енергії при використанні ТН. Джерела теплової енергії для ТН оцінюють за різними критеріями, такими як доступність за розміщенням, доступність у часі, температурний рівень, капітальні витрати для встановлення системи забору теплоти від джерела, експлуатаційні витрати, потенційні проблеми використання джерела і т.п.

Визначення цих параметрів у літературі часто є досить розмитим, як, скажімо, в [2], де терміни вкрай узагальнено. Наприклад, характеристика температурного рівня джерел була представлена наступним чином: "повітря" – "сприятливе для країн на широті США"; "міський водопровід" – "зазвичай задовільний"; "відкриті водойми" – "задовільний" і т.п. За такого підходу неможливо математично порівняти доцільність використання тих чи інших джерел, хоча такі характеристики дають суб'єктивне уявлення про їх особливості.

Разом з тим, це порівняння демонструє, що недоліками ВПВ є їх мала доступність, а перевагами – низькі капітальні та порівняно низькі експлуатаційні витрати. Такий важливий критерій як температурний рівень джерела та зміни температури в часі у ВПВ вважається середнім, що важко віднести як до недоліків, так і до переваг.

³Під використанням енергії ґрунту може йти мова як про використання енергії поверхневих шарів ґрунту (ґрунтові ТН), так і про використання енергії з глибин надр Землі (геотермальні ТН).

⁴Естуарії – це однорукавні, лійкоподібні гирла річок, що розширюються в напрямку моря або океану [26].

В [4] зазначалось, що в умовах міської забудови та значної густоти населення застосування ТН, що використовують ВПВ, вигідніше, ніж ТН, що використовують повітря, внаслідок вищої температури джерела. Тобто порівняння виконано з таких міркувань: чим вища температура джерела теплової енергії, тим вигіднішим є його застосування. Проте для оцінки перспективності ВПВ необхідно брати до уваги не лише їх теоретичний температурний потенціал, а й загальний тепловий потенціал.

2.2. Визначення теплового потенціалу ВПВ за використання ТН. Згідно з [3] серед характеристик, на які потрібно звернути особливу увагу для визначення теплової здатності ВПВ, є кількість доступних водних ресурсів та їх температурний режим.

Під доступністю водних ресурсів розуміють не лише наявність ВПВ поблизу споживача, але й те, яку частку водних ресурсів ВПВ можливо використати для роботи ТН.

В [3] пропонувалось накладати обмеження на відбір води від ВПВ для потреб ТН у кількості, що дорівнює імовірній у 95% випадків об'ємній витраті води в річці. Тобто, кількість води, що могла б використовуватись ТН, мала бути не більшою за таку, що протягом 95% днів року протікає в річці. Це обмеження не є остаточним: допустимий відбір води з ВПВ може бути додатково ще більш обмеженим екологічними вимогами. Схожа ситуація існує з відбором води із каналів [3].

Інакшим був підхід до визначення потенціалу прибережних вод та естуарій. В [3] відзначалось, що практика впровадження ТН, які використовують морську воду, ґрунтується на припущенні, що ці водні ресурси є практично необмеженими [3], і тому їх тепловий потенціал визначається як $\text{МВт}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1})$ – тобто, на одиницю витрати води, що йшла б на потреби ТН, на відміну від річок, для яких тепловий потенціал визначався в МВт, тобто загалом для річки.

Ситуація з визначенням потенціалу води озер є ще складнішою і залежить від багатьох, часом унікальних, факторів. Окрім природних озер, можуть використовуватись і штучні ВПВ [5].

При оцінці температурного режиму ВПВ в

першу чергу перевіряють неможливість утворення льоду в місцях встановлення системи забору води чи теплообмінника для ТН. Важливо забезпечити такий режим роботи, який би не призводив до замерзання води, оскільки це блокує роботу систем забору теплоти та призводить до виходу з ладу блоку ТН [3].

Підхід до вибору температурного режиму води при проходженні блоку ТН залежить від солоності води.

Для прісної води температура замерзання складає 0°C , але в літературі вважається, що охолодження прісної води до цієї температури є неприпустимим. В [2] допускалась можливість охолодження прісної води до $4\text{-}5^\circ\text{C}$, а за необхідності підвищення теплової потужності ТН рекомендувалось збільшувати кількість теплоносія з ВПВ до системи забору теплоти ТН. Іншої думки притримувались у [3] – там найнижчою допустимою температурою охолодження води рекомендувалося вважати 3°C .

Також згідно з [3] максимально допустимий перепад температури при проходженні блоку ТН складав 3°C , а мінімально допустимий перепад – 1°C . Таким чином, мінімально допустимою температурою води ВПВ на вході до блоку ТН вважались 4°C , а за значень температури води ВПВ, вищих 6°C , перепад температури при проході через блок ТН становив не більш ніж 3°C .

Якщо вода солоня, то її температура замерзання знижується. Вміст солі в прибережній (морській) воді умовно прийнято вважати рівним 35‰ [3], хоча на практиці є відхилення від цього значення [6]: солоність може змінюватись від 0 до 40‰. В [3] мінімальне значення температури морської води після проходження блоку ТН визначено як мінус 2°C . За мінімально рекомендованого перепаду температури 1°C мінімальна температура морської води для використання повинна становити мінус 1°C . Цікаво, що на відміну від випадку з прісною водою, мінімальна температура морської води на виході з блоку ТН приймалась практично такою ж самою, як і температура замерзання морської води за вказаної солоності [7]. В [1] було зазначено, що морська вода використовувалась для потреб ТН за температури $5\text{-}7^\circ\text{C}$.

Для естуаріїв умовно приймалось значення солоності в 25‰ [3], хоча допускалися й інші значення солоності. Мінімально допустиму температуру води, яка б відводилась від блоку ТН до естуаріїв за обраного значення солоності, пропонувалося знаходити шляхом лінійної інтерполяції між значеннями прісної води (0‰) та морської води (35‰).

Така увага до питання визначення допустимого перепаду температури води в блоці ТН пояснюється тим, що від значення перепаду температури суттєво залежить розмір теплообмінника, що передає теплову енергію води до блоку ТН, та витрати на експлуатацію насоса, що підводить воду до блоку ТН (для відкритих схем, див. п. 3). Розглянемо це більш детально.

Необхідна площа теплообміну теплообмінника F , м²:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{\text{мені}}}, \quad (1)$$

де Q – необхідна теплова потужність, Вт; k – коефіцієнт теплопередачі теплообмінника, Вт/(м²·К); $\Delta t_{\text{мені}}$ – температурний напір між водою, взятою з ВПВ, та теплоносієм у блоці ТН, К.

Таким чином, чим більшим буде $\Delta t_{\text{мені}}$, тим меншою буде F теплообмінника.

Окрім того, наведемо формулу для визначення необхідної кількості теплової енергії, що буде забиратись від води:

$$Q = c_{\text{вод}} \cdot \rho_{\text{вод}} \cdot L_{\text{вод}} \cdot \Delta t_{\text{вод}}, \quad (2)$$

де $c_{\text{вод}}$ – питома масова теплоємність води, Дж/(кг·К); $\rho_{\text{вод}}$ – густина води, кг/м³; $L_{\text{вод}}$ – об'ємна кількість води, що забирається з ВПВ, та підводиться до блоку ТН, м³/с; $\Delta t_{\text{вод}}$ – різниця між температурою води з ВПВ, що підводиться до блоку ТН, і температурою води після проходження блоку ТН, К.

Тобто, збільшення $\Delta t_{\text{вод}}$ за постійного значення Q дозволить зменшити $L_{\text{вод}}$.

Аргументом проти збільшення $\Delta t_{\text{вод}}$ задля отримання зазначених вище переваг є непередбачуваність впливу значних коливань температури

води у ВПВ на водне середовище та живі організми в ньому [8]. Додамо, що більшість істот, які проживають у прісній воді, є холоднокровними, а тому особливо чутливими до змін температури [9]. Внаслідок цього збільшення перепаду температур можливе лише в штучних ВПВ.

Ще однією проблемою є вибір розрахункового значення температури ВПВ при проектуванні ТН. Річ у тому, що значення температури ВПВ значно змінюються в часі: не тільки протягом року, але й із року в рік. Зміну температури ВПВ пов'язують зі зміною клімату та людською діяльністю.

Дослідження температури річок засвідчують, що їх температура в холодний період року за останні декілька десятиліть зростає [9–12]. Але це зростання носило не поступовий характер: бували випадки, коли після декількох років підвищення температури відбувалось певне її зниження. Також температура річок змінювалася внаслідок людської діяльності, як-то встановлення дамб [10] та облаштування водосховищ [11].

В літературі, наприклад [13], є поради щодо встановлення ТН поблизу точок випуску стічних вод у ВПВ, якщо має місце підвищення їх температури. Таке рішення сьогодні не досить доцільне з огляду на те, що утилізація теплоти від стічних вод безпосередньо на станції може виявитися більш вигідною, ніж утилізація їх у точці випуску.

Є необхідність оцінювати не тільки ефективність застосування ТН, що використовують ВПВ на час їх вводу в експлуатацію, але і враховувати можливість підвищення чи зниження температури води ВПВ у майбутньому. Нехтування цим фактором може призвести до того, що у випадку різкого падіння температури води ВПВ експлуатація деяких ТН може стати неможливою.

Актуальною проблемою залишається якість визначення температури ВПВ, оскільки й сьогодні виникає чимало питань щодо вірогідності та методології отримання цих даних. Вимірювання температури води ВПВ здійснюється, як правило, на певній глибині, однак у літературі посилення на температуру спільно з глибиною часто відсутні, а швидкість течії, при якій виконано вимір, вказується вкрай рідко.

3. Класифікація ТН, що використовують ВПВ. Існують дві принципові схеми роботи ТН: відкриті та закриті (інша назва – замкнені) [8] в залежності від методу забору теплоти від ВПВ (рис. 1).

У відкритій схемі (рис. 1а) вода з ВПВ подається до блоку ТН, охолоджується там і повертається до ВПВ на певній відстані від точки забору – ця відстань повинна бути такою, аби уникнути перемішування потоків від забору та випуску [4]. Якщо в якості джерела теплової енергії використовується річка, то випуск води влаштовують, як показано на рис. 1а, далі по течії від місця закачування води.

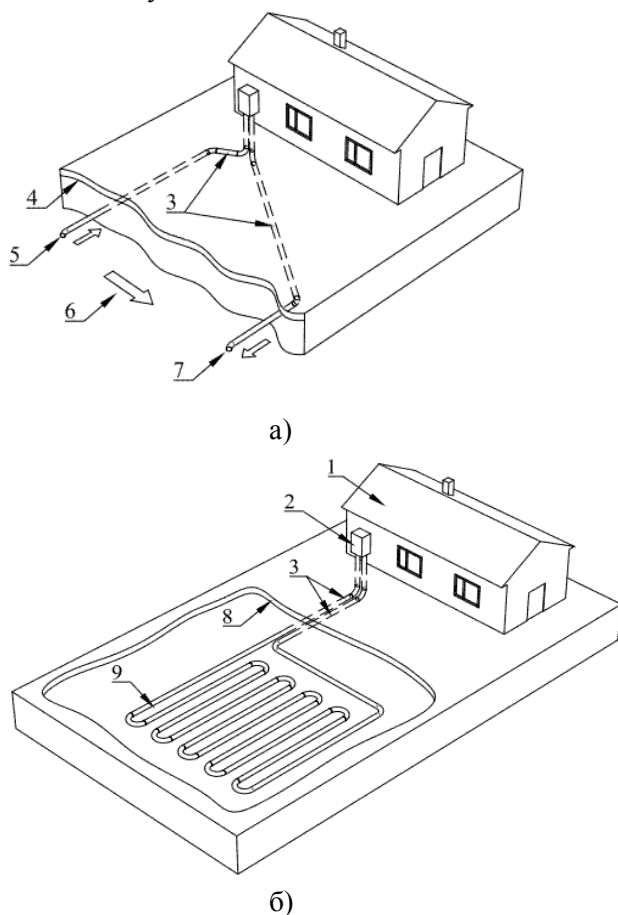


Рис. 1. Принципові схеми конструкцій водяних ТН: а) з відкритим контуром; б) із закритим контуром: 1 – будинок (споживач теплоти); 2 – блок ТН (включає як ТН, так і допоміжні деталі, як насос та ін.); 3 – труби (позначена штриховою лінією ділянка – зариті в землю труби); 4 – річка; 5 – забір води; 6 – напрямок руху річки; 7 – витік води; 8 – озеро; 9 – теплообмінник, занурений у ВПВ.

Примітки: 1. Приклади наведені: а) для річки; б) для озера, а не загалом для ВПВ.
2. На рисунку б) показано один із можливих варіантів встановлення теплообмінника. Є інші варіанти, як у [8].
3. З альтернативним підходом зображення принципових схем можна ознайомитись у [8].

Вода, забрана з ВПВ, може надходити як безпосередньо до випарника ТН [2], так і нагрівати проміжний теплоносіє, що циркулює у додатковому закритому контурі та надходить до випарника ТН (рис. 2). Зараз усе частіше використовують схему з проміжним теплоносієм, оскільки це захищає ТН від впливу дії води (наприклад, корозії) [3].

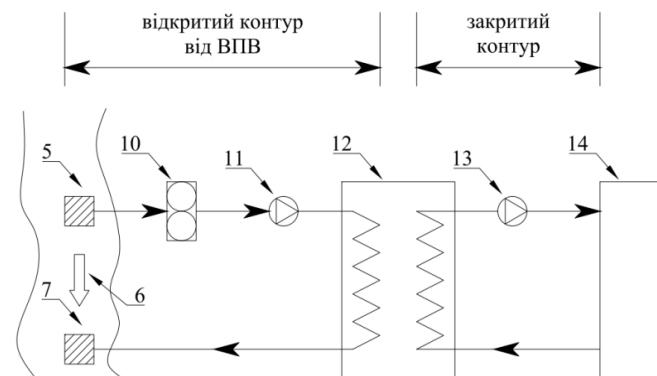


Рис. 2. Принципова схема ТН, що використовує ВПВ, з двома контурами – відкритим та закритим: 10 – система фільтрації; 11 – насос для прокачування води з річки; 12 – теплообмінник; 13 – насос для прокачування води в закритому контурі; 14 – ТН.

Примітки: 1. Номери 5, 6 та 7 на схемі співпадають з номерами на рис. 1.

2. З альтернативним підходом зображення даної схеми можна ознайомитись в [3]. Схожа за інформативністю схема є в [14].

За відкритої схеми для захисту блоку ТН від забруднення пропонується встановлення системи очищення води від грубих решток шляхом застосування фільтрувальних решток, причому останні потрібно влаштовувати у подвійній кількості [13]. Цим забезпечують безперервний процес роботи при їх заміні. Зменшенню кількості забруднень може посприяти встановлення точки забору води в місцях швидкої течії з метою мінімізації кількості мулу, що міститься у воді. Тому для проектування першого ступеня фільтрації важливе значення мають дані про превалюючий напрямок течії та мінімальну й максимальну швидкість потоку води [4].

Іншою не менш важливою задачею при облаштуванні відкритих схем є встановлення запобіжних систем для уникнення пошкодження ареалу проживання водяних істот [8].

Окрім того, в ТН за даної схеми роботи є одна особливість, яка може негативно вплинути на екологію ВПВ. У місцях закачування води з ВПВ до блоку ТН та місцях її випуску назад до ВПВ можуть виникнути токи води, які будуть значнішими за природні токи у ВПВ (це особливо стосується озер). Утворені внаслідок роботи ТН токи можуть призвести до підняття придонних забруднень, а разом з ними – і поживних речовин з нижніх прошарків води на вищі, що безпосередньо вплине на якість води. Наприклад, може різко збільшитись кількість поживних речовин, якими живляться водорості. Таке збагачення ВПВ біогенними елементами (евтрофікація) призведе до зменшення кількості кисню в воді (гіпоксії), і результатом цього процесу може стати смерть живих організмів у ВПВ [8].

У відкритій схемі ТН (рис. 2) з проміжним теплоносієм (як правило, гліколем), що циркулює у додатковому закритому контурі, є ще одна вада, а саме – можливість пошкодження контуру та витік проміжного теплоносія, що також призведе до забруднення ВПВ.

При застосуванні закритої схеми (рис. 1б) у ВПВ занурено теплообмінник, який ззовні омивається водою ВПВ, а через нього проходить проміжний теплоносій, що забирає теплоту від води у ВПВ та підводить її до ТН.

Використання теплообмінника, зануреного у ВПВ, дозволяє захистити від виходу з ладу всю конструкцію ТН, оскільки вода не контактує з ТН. Схожий підхід, як було показано вище, має місце і у відкритій схемі (рис. 2). Відмінність полягає в тому, що закрита схема не потребує облаштування системи фільтрації води.

Для запобігання зниженню кількості поглинутої теплоти внаслідок забруднення проміжного теплообмінника, розташованого у ВПВ, його розрахункову площу приймають із певним запасом [14].

Закриті схеми з використанням гліколю, як вказано вище, потенційно можуть спричинити забруднення ВПВ, більш того, вони є набагато уразливішими через великий розмір та відкрите розташування теплообмінника. Пошкодити його можуть як природні чинники (лід, вітер), так і діяльність людини (катання на човнах) [8]. До

того ж, закриті схеми проблематично встановлювати за наявності сильних течій – теплообмінник може зміститись внаслідок значної швидкості потоку в річці, і це відповідно виведе з ладу систему підводу проміжного теплоносія до випарника ТН. Такі системи потребують спеціальних інженерних рішень для їх закріплення у ВПВ [5].

Вибір однієї з двох вказаних систем ТН залежить від параметрів ВПВ. При виборі можна узагальнено керуватися наступними міркуваннями.

За наявності у ВПВ сильних течій чи значної кількості водного транспорту бажаною стає менш вразлива відкрита схема, а відповідно у протилежному випадку – можливим є встановлення закритої схеми.

За високої забрудненості води ВПВ перевагу надають закритим схемам, оскільки очищення води за застосування відкритої схеми призведе до значних витрат на забезпечення роботи системи фільтрації води.

При облаштуванні потужних систем надають перевагу відкритим схемам, оскільки встановлення у водойму великих за габаритами теплообмінників закритих схем не завжди є технічно можливим та економічно виправданим.

4. Закордонний досвід впровадження ТН, що використовують ВПВ. У технічній літературі приклади впровадження ТН, що використовують ВПВ, переважно присвячені потужним ТН. Тому далі представлено тільки потужні системи. При виборі характеристик ТН до уваги приймається температура води ВПВ до та після проходження системи забору теплоти в холодний період року і температура в системі теплопостачання:

- Першою порівняно великою теплонасосною станцією була установка, розташована в м. Цюрих (Швейцарія) запущена в 1938-1939 роках [2]. В холодний період року ТН працював для забезпечення системи опалення за температури 40-45°C згідно з [15]. Щоправда, в пікові години електроспоживання використовувалась лише раніше акумульована теплова енергія. Також протягом опалювального періоду використовувалась допоміжна електрична система опалення. Температура води в озері перед випарником ТН складала 3°C, а після охолодження в ньому 1,5°C.

- У 1945 році в м. Норвіч (Великобританія) для опалення будівель була побудована система тепlopостачання від ТН, що використовував річкову воду. Температура річкової води складала на вході до блоку ТН $4,5^{\circ}\text{C}$, а після охолодження на виході $3,3^{\circ}\text{C}$. Температура води в системі тепlopостачання на вході в конденсатор ТН складала $44,5^{\circ}\text{C}$, а на виході з нього 50°C [2].

- В період із 1984-1986 рр. на островах біля м. Стокгольм (Швеція) була побудована система з шести ТН, які використовували в якості джерела теплової енергії морському воду [16]. Вона охолоджувалася з $2,5^{\circ}\text{C}$ до $0,5^{\circ}\text{C}$. Температура в мережі тепlopостачання складала $80-57^{\circ}\text{C}$. Теплогенеруюча потужність кожного ТН становила 30 МВт за кількості спожитої електроенергії 8 МВт. Також було вказано, що в холодний період року морська вода забиралася на глибині 15 м за температури 3°C , що на $0,5^{\circ}\text{C}$ вище, ніж розрахункове значення системи, прийняте на стадії проектування.

- У 2012 році в південній частині м. Лондон (Великобританія) була створена система водяного теплонасосного тепlopостачання [17, 18]. Вода, яка циркулює в цій системі, досягає температури 45°C . Температура води в Темзі згідно з [17, 19] коливається протягом року в межах $8-10^{\circ}\text{C}$, а компанія-розробник [18, 19] додає, що на глибині 2 м та нижче температура води в Темзі не опускається нижче 7°C .

В першому з наведених вище прикладів впровадження ТН (м. Цюрих, Швейцарія), використовувалась прісна вода, яку охолоджували нижче рекомендованого в [3] значення 3°C . Пізніше розрахункова температура води ВПВ, яка подається до ТН, зростала – це може бути пов'язане як з більш виваженим підходом до вибору джерела теплоти, так і зі зміною теплового режиму ВПВ (внаслідок зміни клімату Землі). Не виключено також, що розробники могли вказувати занадто осереднену температуру води. Наприклад, у науковій доповіді щодо зміни клімату [9] показано, що в певні місяці температура Темзи може бути як більшою, так і меншою за діапазон, вказаний у останньому прикладі (м. Лондон, Великобританія).

Наведені приклади демонструють, що цікавість до вивчення водяних ТН не спадає. Діяльність у цьому напрямку не обмежується лише введенням в експлуатацію нових ТН, а ще й знаходить підтримку наукових досліджень щодо їх впровадження з боку державних установ. Наприклад, в Англії була видана карта потенціалу використання річок та озер в якості джерел теплової енергії [3], на основі якої зроблено висновок, що близько 60% потреб у гарячій воді м. Лондон можна задовольнити за допомогою ТН, що використовуватимуть річку Темзу в якості джерела теплової енергії [20].

Хоча закордонний досвід безумовно має бути вивченим, тим не менш потрібно враховувати, що клімат країн, які були згадані в прикладах, суттєво відрізняється від клімату України, а це може потребувати інших конструктивних рішень та підходів до вирішення проблем.

5. Історія вивчення ТН, що використовують ВПВ, в Україні. Сьогодні в Україні темі ТН, що використовують ВПВ, приділяють недостатньо уваги попри досить тривалий період існування цієї технології та значний обсяг інформації, який виник у світі в результаті її досліджень.

В книзі [15], виданій 1955 року в СРСР, стверджувалось, що використання річок та морів СРСР має певний потенціал, хоча і з деякими обмеженнями. У цьому виданні річки поділяли на перспективні, в яких температура води на певній глибині складала в холодний період року $4-6^{\circ}\text{C}$, та на річки, в яких утворювався лід на дні, що свідчило про неможливість їх використання внаслідок температури води, близької до 0°C .

В [15] також наводилась запропонована на нараді з питань впровадження ТН в СРСР схема забору теплоти від річок. Річкову воду рекомендувалось охолоджувати з 3 до 2°C , а перепад температури теплоносія в системі опалення приймали $42-35^{\circ}\text{C}$. Ці значення температури є досить близькими до тих, що мали місце при побудові першої потужної ТН у Швейцарії, про яку мова йшла раніше [2].

Що стосується використання в СРСР морської води в якості джерела теплової енергії для ТН, то згідно з [15] теоретично імовірним

місцем впровадження вважалась північна частина Чорного моря, оскільки температура води в лютому там не опускалась нижче 6-8°C за винятком Одеської затоки, де спостерігалось замерзання прибережної смуги. Як уже згадувалось, замерзання є небажаним явищем при встановленні ТН, тому навіть короткотривалість цього замерзання (менше місяця) є суттєвою перешкодою на шляху впровадження ТН.

Одним із місць практичного використання морської води в якості джерела теплової енергії для ТН став Крим. Як приклад можна навести ТН, що був встановлений у пансіонаті "Дружба", побудованому в 1985 році [21, 22]. Біля місця розташування пансіонату температура морської води в холодний період року складала 8-9°C. Для проведення розрахунків було прийнято нижче із вказаних значень температури, що температура морської води, яка подавалась до блоку ТН, приймалась 8°C та поверталась охолодженою до 6°C.

В Україні, згідно з розпорядженням Президії НАН України №142 від 5 березня 2014 р. [23, 24], Інститутом технічної теплофізики НАН України було розпочато науково-технічний проект, однією зі складових якого було впровадження системи ТН, що використовує в якості джерела теплової енергії затон річки Десна. Згідно з планом, представленим у [24], запропоновано застосування закритої схеми.

6. Порівняння повітря та ВПВ в якості джерел теплової енергії для ТН в Україні для холодного періоду року. На початку статті було вказано, що застосування ВПВ є вигіднішим за повітря в якості джерела теплової енергії внаслідок вищої температури теплоносія [4]. Довести це твердження можна, визначивши орієнтовні значення COP в умовах України в холодний період року. Дані розрахунків представлені комплексно в табл. 1.

На початку розрахунків необхідно обумовити значення температури джерел теплової енергії. В якості розрахункової температури ВПВ згідно з наведеними прикладами застосування обираємо значення +6°C та +8°C. В якості температури повітря обираємо діапазон значень: -25°C; -20°C та -15°C, що демонструють характеристики повітря, прийняті в якості розрахункового зна-

чення температури зовнішнього повітря для систем опалення більшості регіонів України в холодний період року.

Визначимо теоретичний COP ψ теплового насоса:

$$\psi = \frac{T_{\text{конд}}}{T_{\text{конд}} - T_{\text{вип}}}, \quad (3)$$

де $T_{\text{конд}}$, $T_{\text{вип}}$ – температура відповідно у конденсаторі та у випарнику ТН, К.

Оскільки температура джерел вказана у градусах Цельсія, а розрахунки COP проводять у Кельвінах, виконаємо заміну величин $T_{\text{конд}}$ та $T_{\text{вип}}$:

$$T_{\text{конд}} = t_{\text{конд}} + 273,15, \quad (4)$$

$$T_{\text{вип}} = t_{\text{вип}} + 273,15. \quad (5)$$

Визначення температур у конденсаторі $t_{\text{конд}}$ та випарнику $t_{\text{вип}}$ не є очевидним. Перш за все, температура у конденсаторі ТН має бути вищою за температуру в системі тепlopостачання для здійснення теплообміну, а відповідно для випарника температура має бути нижчою за температуру джерела теплової енергії. Окрім того, у схемах ТН, що використовують ВПВ, часто встановлюють закритий контур для циркуляції проміжного теплоносія; за такого підходу температура теплоносія, що віддає теплоту у випарнику ТН, буде нижчою за температуру джерела. В цій роботі для розрахунків умовно прийнято, що температура холодоагенту в конденсаторі ТН є вищою за температуру теплоносія, який подається в систему тепlopостачання, на $\Delta t_{\text{np mn}} = 5^\circ\text{C}$, а температура холодоагенту у випарнику ТН є меншою за температуру джерела теплової енергії на $\Delta t_{\text{дж mn}} = 5^\circ\text{C}$:

$$t_{\text{конд}} = t_{\text{mn}} + \Delta t_{\text{np mn}}, \quad (6)$$

$$t_{\text{вип}} = t_{\text{дж}} - \Delta t_{\text{дж mn}}. \quad (7)$$

Зауважимо, що прийняті різниці температур можуть бути й іншими, як, наприклад, показано в [16].

Таким чином, визначивши температури, можна отримати теоретичні значення COP за формулою (3). Проте на практиці значення COP є

меншими за теоретичні. В [25] було запропоновано визначати реальні значення COP ψ_{real} за формулою:

$$\psi_{real} = (0,5 \dots 0,75) \psi \quad (8)$$

Перепишемо формулу (8) з урахуванням формул (3)–(7) і отримаємо:

$$\psi_{real} = (0,5 \dots 0,75) \frac{t_{mn} + \Delta t_{mn np} + 273,15}{(t_{mn} + \Delta t_{mn np}) - (t_{djc} - \Delta t_{djc np})} \quad (9)$$

Є й інші підходи щодо визначення реального значення COP. В [15] була рекомендована формула для розрахунку реального COP $\psi_{real(M)}$ при використанні поршневого компресора, з урахуванням особливостей тодішніх холодоагентів та деяких спрощень, прийнятих тоді для практичного застосування технології ТН:

$$\psi_{real(M)} = 0,74 \frac{T'_0}{T_\kappa - T'_0} - \left(0,0032 T'_0 + 0,765 \frac{T'_0}{T_\kappa} \right) + 0,9 \quad (10)$$

де T_κ , T'_0 – температура конденсації та випарування, К. В даній роботі ці параметри відповідають $T_\kappa = T_{конд}$ та $T'_0 = T_{вип}$ з формули (3).

Перепишемо формулу (10) з урахуванням вище наведених формул:

$$\psi_{real(M)} = 0,74 \frac{t_{djc} - \Delta t_{djc np} + 273,15}{(t_{mn} + \Delta t_{mn np}) - (t_{djc} - \Delta t_{djc np})} - \left[0,0032 (t_{djc} - \Delta t_{djc np} + 273,15) + 0,765 \frac{t_{djc} - \Delta t_{djc np} + 273,15}{t_{mn} + \Delta t_{mn np} + 273,15} \right] + 0,9 \quad (11)$$

Після розрахунку за вказаних значень ψ_{real} та $\psi_{real(M)}$ можна приступити до аналізу отриманих у табл. 1 значень COP. Розрахунком підтверджено, що значення COP при використанні ВПВ є суттєво вищими, ніж для повітря.

Оскільки на даний час значна частка електроенергії все ще генерується на газових та вугільних ТЕЦ, важливо порівняти отримані значення COP з їх мінімально допустимими значеннями, за яких необхідна кількість палива за роботи ТН буде меншою, ніж така, що необхідна для забезпечення тих самих потреб при безпосередньому використанні теплогенеруючих установок на газовому та вугільному паливі.

Таблиця 1. Значення COP у холодний період року за використання в якості джерела теплової енергії води та повітря

COP за формулою	Температура теплоносія, t_{mn} , °C	Джерело теплової енергії та його температура, t_{djc} , °C				
		Повітря			Вода	
		-25	-20	-15	+6	+8
(9)	30	2,37...3,56	2,57...3,85	2,80...4,20	4,53...6,80	4,81...7,22
	45	2,02...3,03	2,15...3,23	2,31...3,46	3,30...4,95	3,44...5,16
	60	1,78...2,67	1,88...2,82	1,99...2,98	2,64...3,96	2,73...4,09
(11)	30	2,29	2,55	2,87	5,31	5,72
	45	1,80	1,97	2,17	3,51	3,71
	60	1,47	1,58	1,72	2,57	2,69

Примітки: 1. Підхід до розрахунку даної таблиці представлено в розділі 6.

2. Значення $\Delta t_{np mn} = 5^\circ\text{C}$ та $\Delta t_{djc mn} = 5^\circ\text{C}$ згідно методики в розділі 6.

3. При розрахунках COP за формулою (11) сірим кольором виділено клітинки, в яких значення є меншим за 2,505. Це свідчить, про неефективність обраного джерела при живленні ТН від ТЕЦ з ККД 40%.

Згідно з [25] при ККД електростанції 30% мінімальне допустиме значення COP мало перевищувати 3,34, а при ККД електростанції 40% – бути більшим за 2,505. Дана методика хоч і є наближеною (зокрема, не враховує втрат при транспортуванні електроенергії чи теплової енергії, або ж втрат при генеруванні теплової енергії), однак отримані значення дають уявлення про доцільність застосування ТН, математично оцінюючи ефективність перетворення палива в електроенергію. Це створює умови для прийняття виваженого рішення: чи є достатнім COP для встановлення ТН, чи раціональніше буде використати теплогенеруючу установку на традиційному паливі.

Як показує аналіз табл. 1, використання повітря в якості джерела теплової енергії за прийнятих умов не є вигідним, оскільки в чималій кількості випадків COP буде меншим за мінімальне допустиме значення при ККД генерації електроенергії 40%. Водночас COP при використанні ВПВ у якості джерела енергії є вищим за вказане мінімальне допустиме значення в усіх розглянутих випадках.

Висновки. 1. В роботі показано, що використання ВПВ в якості джерела теплової енергії має під собою технічне та економічне підґрунтя. Внаслідок вищої температури джерела теплової енергії в холодний період року ТН, які використовують ВПВ, матимуть вищий COP, ніж ТН, що використовують повітря. Інші можливі переваги будуть розглядатись у наступних роботах. Це дозволить не тільки обґрунтувати зиск від заощадження енергетичних ресурсів, але й загалом зробити політику впровадження ТН більш технологічно визначеною.

2. За кордоном ТН, які використовують ВПВ, впроваджувалися ще в 40-х роках ХХ століття, але найбільший розвиток ТН такого типу прийшовся на останні десять років. Цьому сприяли програми досліджень потенціалу ВПВ, які дозволили розробити методику визначення найбільш оптимальних місць розташування ТН та окреслити нові вимоги до технології раціонального використання потенціалу ВПВ. Цей досвід має бути вивчений і застосований при аналізі можливостей поширення технології ТН в Україні.

3. На сьогодні в Україні ТН, які використовують ВПВ, не отримали широкого розповсюдження. Одним із можливих стимулів для їх впровадження могла б стати розробка атласу теплового потенціалу ВПВ України та методики оцінки позитивного впливу від використання ТН на економічний та технічний стан інфраструктури тих районів, де потенціал ВПВ буде визнано перспективним.

4. Відповідно до останніх світових тенденцій особливу увагу слід приділити вивченню надпотужних ТН, що використовують ВПВ, оскільки такі системи є альтернативою традиційним теплогенеруючим установкам теплових мереж України. Сама можливість облаштування в межах України надпотужної ТН, що використовує ВПВ, стала б приводом для широкої зацікавленості у використанні технології ТН.

1. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії [Текст] : підруч. / С.О.Кудря. – К. : НТУУ "КПІ", 2012. – 492 с.

2. Рей Д.А. Тепловые насосы [Текст] / Д.Рей, Д.Макмайкл; Пер. с англ. Е.И.Янговского. – М. : Энергоиздат, 1982. – 224 с.

3. National Heat Map : Water source heat map layer [Online document]. Url: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416660/water_source_heat_map.PDF. Date of application: 14.05.2015.

4. Water Source Heat Pumps – Navigating the Way: A Customer [Online document]. Url: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416665/navigating_the_way_a_customer_journey_for_potential_developers.pdf. Date of application: 14.05.2015.

5. The wonders of water source. [Electronic resource]. Url: <http://www.stiebel-eltron.co.uk/business-partners/news/technical-expert-blog/the-wonders-of-water-source/>. Date of application: 14.05.2015.

6. Шамраев Ю.И. Океанология [Текст] / Ю.И.Шамраев, Л.А.Шишкина; под ред. А.В.Некрасова, И.П.Карповой. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 382 с.

7. Жуков Л.А. Общая океанология [Текст] / Л.А.Жуков; Ю.П.Доронина. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 376 с.

8. The drop on water. Surface Water Heat Pumps [Online document]. Url: https://novascotia.ca/nse/water/docs/droponwaterFAQ_SurfaceWater-HeatPumps.pdf. Date of application: 14.05.2015.

9. Climate change impacts and water temperature : Science Report [Online document]. Url: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416665/navigating_the_way_a_customer_journey_for_potential_developers.pdf

[nt_data/file/290975/scho0707bnag-e-e.pdf](#). Date of application: 14.05.2015.

10. *Webb B.W.* Recent advances in stream and river temperature research [Text] / Bruce W. Webb *et al* // Hydrological Processes. – 2008. – V. 22. – № 7. – P. 902–918.

11. *Вандюк Н.С.* Динаміка температурних характеристик водних мас Канівського водосховища [Текст] / Н.С.Вандюк // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2010. – № 3. – С. 83–88.

12. *Струтинська В.* Сучасні зміни елементів водно-теплового балансу в басейні Дніпра як передумова змін термічного та льодового режиму річок [Текст] / В.Струтинська, В.Гребінь // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія Географія. – 2007. – Т. 54. – № 1. – С. 24–26.

13. *Хайнрих Г.* Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения [Текст] / Г.Хайнрих, Х.Найорк, В.Нестлер ; Пер. с нем. Н.Л.Кораблевой, Е.Ш.Фельдмана ; Под ред. Б.К.Явнеля. – М.: Стройиздат, 1985. – 352 с.

14. Viessmann: Руководство по проектированию [Электронный документ]. Url: http://www.viessmann.ua/content/dam/internet-ua/pdf_dokumente/top-info_6/viessmann_wp_planungshandbuch04-2012.pdf. Дата звернення: 5.06.2015.

15. *Мартыновский В.С.* Тепловые насосы [Текст] / В.С.Мартыновский – М.,Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 192 с.

16. Vaertan Ropsten – The largest sea water heat pump facility [Online document]. Url: http://www.friotherm.com/webautor-data/41/vaertan_e008_uk.pdf. Date of application: 14.05.2015.

17. Exclusive: Renewable energy from rivers and lakes could replace gas in homes [Electronic resource]. Url: <http://www.independent.co.uk/environment/climate-change/exclusive-renewable-energy-from-rivers-and-lakes-could-replace-gas-in-homes-92102.html>. Date of application: 14.05.2015.

18. MISTSUBISHI ELECTRIC Heat pumps provide community heating via the River Thames [Online document]. Url:

http://heating.mitsubishielectric.co.uk/KnowledgeBase/Public/kingston_case_study.pdf. Date of application: 14.05.2015.

19. The open water heat pump system [Electronic resource]. Url:

<http://www.zerocarbonpartnership.com/technical.html>. Date of application: 14.05.2015.

20. Are open-water heat pump systems a game changer? [Electronic resource]. Url: http://www.modbs.co.uk/news/fullstory.php/aid/14365/Are_open_water_heat_pump_systems_a_game_changer_.html. Date of application: 14.05.2015.

21. *Курдюмова К.А.* Внедрение энергосберегающей технологии использования низкпотенциальной теплоты Черного моря для отопления пансионата "Дружба" в г. Ялте [Текст] / К.А.Курдюмова, А.П.Куратенко // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 2. – С. 119–124.

22. *Курдюмова К.А.* Опыт эксплуатации теплонасосной станции пансионата "Дружба" [Текст] / К.А.Курдюмова, А.П.Куратенко // Холодильная техника. – 1991. – № 11. – С. 7–9.

23. Національна Академія Наук України. Розпорядження № 142 від 05.03.2014 р. [Електронний документ]. Url: http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2014/directions/OpenDocs/140305_142.pdf. Дата звернення: 14.05.2015

24. *Снежкін Ю.Ф.* Энергозберігаючі теплонасосні технології для систем теплопостачання житлово-комунального господарства і промисловості [Електронний документ] / Ю.Ф.Снежкін // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті – Київ, 2015. Url: http://ive.org.ua/?page_id=768. Дата звернення: 14.05.2015

25. *Кулик В.В.* Проблеми і перспективи розвитку в Україні теплонасосних технологій [Текст] / В.В.Кулик, В.Д.Білодід // Проблеми загальної енергетики : науковий збірник. – 2006. – № 14. – С. 7–12.

26. *Карпенко Н.І.* Рельєф морських берегів [Текст] / Н.І.Карпенко – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2009. – 308 с.