

Дем'яненко Ю.І.¹, Глауберман М.А.²

¹ Одеський національний технологічний університет, <dejurij@gmail.com>

² Навчально-науково-виробничий центр ОНУ імені І. І. Мечникова, mik_ag@i.ua

Варіанти конструктивних рішень первинного контуру ТН «повітря-вода» для схем теплопостачання приватних житлових будинків

В статті розглянуто варіанти облаштування первинного контуру теплових насосів «повітря – вода». З точки зору капітальних затрат і терміну будівництва повітряний ТН є найвигіднішим. Але йому притаманний суттєвий недолік: падіння теплопродуктивності при зменшенні температури зовнішнього повітря, – саме тоді, коли потреба в теплі зростає. Для покриття пікових теплонавантажень система опалення доукомплектується дублюючим джерелом тепла – як, правило, це електронагрівальна вставка.

Пошуки шляхів усунення або суттєвого зменшення залежності теплопродуктивності повітряних ТН від температури зовнішнього повітря представлені трьома варіантами конструкцій випарника теплового насоса «повітря – вода»: із «класичним» теплообмінником у вигляді мідних трубок з алюмінієвим пластинчастим оребрением і вимушеним рухом повітря за допомогою вентилятору; із вертикальним міднотрубним теплообмінником з алюмінієвими плавниковими ребрами і вільним рухом повітря – Осторіста теплообмінником у формі садибного паркану – однорядного трубного реєстру із поліетиленових труб (німецька технологія Energiezaun).

Представлені розрахунки поверхні енергетичного паркану для житлового будинку в м. Одесі.

Ключові слова: випарник теплового насосу «повітря – вода», первинний контур теплового насосу, первинний контур теплового насосу, мідні труби з алюмінієвими плавниковими ребрами, енергетичний паркан.

Вступ. Тепловий насос «повітря – вода» за дешевизною, вартістю та тривалістю монтажних і пуско-налагоджувальних робіт є поза конкуренцією на ринку теплових насосів. Картину псує пряма залежність теплопродуктивності від температури повітря. Відомо, що продуктивність ТН, які використовують для опалення приміщень низькопотенційне тепло зовнішнього повітря, зменшується вслід за його температурою і досить суттєво: за температури -20°C теплопродуктивність на 40 % менше номінальної, вказаної в паспорті для температури $+7^{\circ}\text{C}$ (розрахункова температура холодного періоду в м. Токіо).

Щоб уникнути цього впливу або зменшити його, застосовуються різні підходи. Для збільшення теплотворності використовується «переразмеренный» (термін інсталяторів) апарат.

Але, по-перше, в габарити випарника неможливо «вписати» апарат з поверхнею, яка б забезпечувала теплом первинний контур у всьому діапазоні температур зовнішнього повітря впродовж опалювального періоду. По-друге, можливості інтенсифікувати процес теплопередачі у випарнику вичерпані. Всучасних моделей компактність сягає понад $100\text{ м}^2/\text{м}^3$. По-третє, нарощування швидкості повітря у випарнику обмежене зростанням опору апарату. Тому в схему опа-

лення на основі ТН «повітря – вода» вводиться додаткове джерело тепла для покриття пікових навантажень. Це спричиняє зменшення сезонного коефіцієнту перетворення тепла (SPF), а, отже, збільшення терміну окупності.

Прорив у цьому питанні здійснила фірма MitsubishiElectric. Запропонована у 2005 р технологія проміжного впорскування пари в циліндр компресора дозволяє повітряному ТН працювати з номінальною теплопродуктивністю до -15°C , а до -25°C зі втратою лише 15 % (рис.1). Але платою за це є зменшення COP. Якщо при -15°C $\text{COP} = 3.2$, то при -25°C $\text{COP} = 2.2$.

Пошуки нових рішень, які б розширили можливості повітряних ТН, тривають: останнім часом на ринку з'явилося нове обладнання – це тепловий насос Octorus [2] та німецька технологія Energiezaun – енергетичний паркан [3]. В ТН Octorus застосовано випарник без вентилятора – з вільною конвекцією зовнішнього повітря.

Але зменшення споживання енергії (встановлена потужність вентилятора випарника у моделі MitsubishiElectric такої ж холодопродуктивності, як в ТН Octorus, всього $N=144$ Вт) ніяк не виправдане, тим більше, що обмерзання випарника, за даними інсталяторів, починається вже від температури повітря $+10^{\circ}\text{C}$ [4].

На цьому тлі вигідно відрізняється німецька технологія Energiezaun – енергетичний паркан [3]. Труби його первинного контуру заповнені теплоносієм і поглинають навколишнє тепло від сонця, повітря та води, передаючи його тепловому насосу. Підземна частина паркану слугує теплоаккумулятором, який зберігає тепло протягом ночі та холодних днів і дозволяє використовувати систему впродовж опалювального сезону з найвищим рівнем ефективності без необхідності вмикати додаткове джерело опалення – виробник заявляє, що ТН з первинним контуром у вигляді енергетичного паркану є моновалентною системою опалення.

1. Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Як декларує фірма MitsubishiElectric [1], теплові насоси ZUBADAN INVERTER забезпечують 95 % потреби в тепловій енергії, але їхній середній коефіцієнт перетворення за опа-

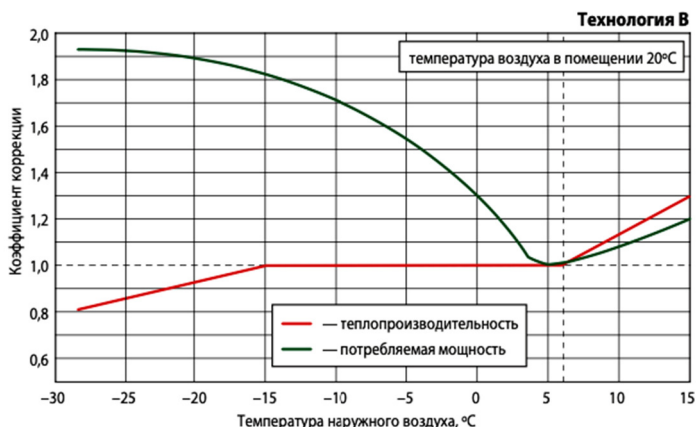


Рис. 1. Залежність теплопродуктивності і споживаної потужності теплових насосів ZUBADAN INVERTER від температури зовнішнього повітря



Рис. 2 Випарник ТН Octorus

лювальний період порівняно невеликий і становить близько 2.1 (рис. 1).

Теплові насоси цієї ж фірми на базі систем POWER INVERTER та CITY MULTI характеризуються високим середнім коефіцієнтом перетворення (близько 3.5), проте вони забезпечують менший рівень покриття потреби в теплі (близько 80%).

ТН Octorus [2], згідно техпаспорту, відрізняється випарником оригінальної конструкції, відсутністю вентилятора та не потребує відтавання. Заявлено, що випарник складається з пучка вертикальних мідних труб з плавниковими алюмінієвими ребрами (рис.2).

Плавникове ребро складається із 2-х метрів мідних труб діаметром 22 мм в алюмінієвому профілі, що в цілому дає площу, еквівалентну 64 метрам гладких мідних труб. Наприклад, випарник IS48 складається з 12 плавникових ребер із загальною площею, еквівалентною 770 метрам мідних труб. Пропан усередині мідних труб одержує енергію з повітря навколишнього середовища. Як вказано в одному із розділів техпаспорту, випарник не має частин, що рухаються (тобто вентилятора), і не вимагає відтавання [2].

Інформація від експлуатаційників про роботу ТН Octorus вкрай негативна. Один із інсталяторів вказує, що значним недоліком Octorus є намерзання льоду і перекривання доступу повітря до поверхні випарника від температури $+10^{\circ}\text{C}$ і нижче [4]. Приводиться також залежність COP від температури зовнішнього повітря для Латвії (рис.3).

Енергетичний паркан [3] представляє собою первинний контур ТН у вигляді регістру із поліетиленових труб, 2/3 висоти якого знаходяться на відкритому повітрі, а 1/3 заглиблена в землю. Довжина регістру залежить від теплового навантаження первинного контуру.

Щоб уникнути необхідності вмикати додаткове опалення в особливо холодні дні, до паркану підключається підземний трубний колектор, укладений в траншею (рис.4). Наповнена піскомабо базальтом, ця траншея зберігає тепло для ночі та холодних днів.

Існує варіант заповнення траншеї водою. При замерзанні води виділяється кристалізаційне тепло, яке також подається в контур опалення [5].

3. Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Отже, головний напрямок всіх пошуків – збереження номінальної COP ТН при змен-

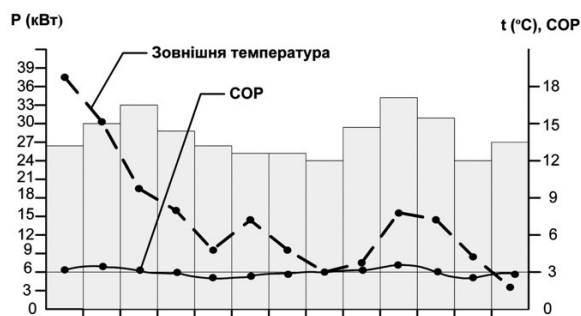


Рис. 3 Залежність COP ТН Octorus від температури зовнішнього повітря [4]

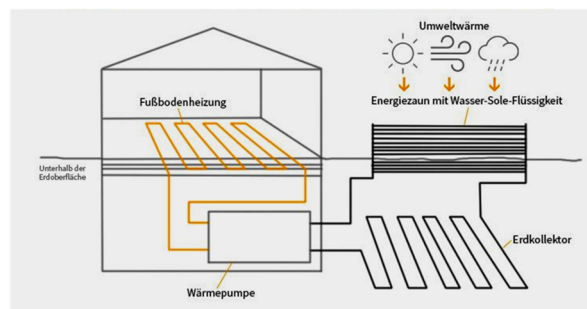


Рис. 4 Принципова схема системи опалення на основі технології Energiezaun [7]

Таблиця 1. Середньодобові параметри повітря в Одесі впродовж опалювального періоду

Місяць	10	11	12	1	2	3	4
Температура, °С	11.3	5.8	1.1	-1.3	-0.6	2.9	9.2
Відносна вологість, %	76	82	83	82	81	79	75
Точка роси, °С	7.1	2.5	0.3	-3.2	-2.1	0.5	5.2
Темпер розсолу(труби) при $\Delta t = 5\text{K}$	6.3	0.8	-3.9	-6.3	-5.6	-2.1	4.2

шенні температури повітря. MitsubishiElectric ілюструє (рис. 1), як за температур $< + 5^{\circ}\text{C}$ для збереження теплопродуктивності необхідно збільшувати витрати енергії, жертвуючи величиною COP.

Аналіз роботи повітряних ТН показує, що в умовах м. Одеси обмерзання випарника матиме місце впродовж більшої частини опалювального періоду (табл. 1).

Як видно із таблиці, обмерзання труб енергетичного паркану спостерігатиметься впродовж чотирьох місяців – з грудня по березень включно, коли температура труби буде від’ємною і нижчою, ніж температура точки роси повітря. Очевидно, що режим відтавання також призводить до зменшення теплопродуктивності.

Суперечливі дані містить технічний паспорт ТН Octopus[2]. З одного боку, вказано, що ТН не потребує відтавання, а з іншого – робота тільки при температурах зовнішнього повітря вище $+ 10^{\circ}\text{C}$.

В результаті за даними інсталяторів взимку ТН Octopus працює як електрокотел (в комплект ТН входить електронагрівальна вставка потужністю 6-12 кВт).

Таким чином конструкція випарника з плавниковими ребрами і вільною конвекцією повітря нічим не виправдана. Обмерзання випарника, низьке значення його питомої поверхні ($29,7 \text{ м}^2/\text{м}^3$ у ТН Octopus проти $124,3 \text{ м}^2/\text{м}^3$ у ZUBADAN INVERTER рівної теплопродуктивності) та вартість монтажу (фундамент під випарник (рис.2), траншея до нього, мідні труби для холодильного агенту) робить недоцільним використання цієї конструкції.

На цьому тлі вигідно виділяється технологія Energiezaun [3,4]. Енергетичний паркан поглинає навколишнє тепло від сонця, повітря та води. Накопичуючи енергію, він використовує її для нагрівання теплоносія. Тепло відводиться в підземну частину паркану, що дозволяє експлуатувати систему вночі і особливо в холодні та похмурі дні (температура землі вища, ніж у зовнішнього повітря[5]). Як тільки температура зовнішнього повітря підвищується, наземний паркан отримує енергію з навколишнього середовища і, таким чином, відновлює потенціал підземної частини. Її глибина залежить від висоти енергетичного паркану і повинна бути не менше $1/3$ його висоти (максимум 1 м) [6]). На відміну від ґрунтових колекторів, які за сезон охолоджують ґрунт, теплоакумуюча здатність підземної частини паркану постійно оновлюється. Тому на установку паркану не потрібен дозвіл природоохоронної інспекції.

Через асиміляцію сонячної енергії та теплоти конденсації водяної пари (утворення інію) система може бути значно економічнішою, ніж тепловий насос повітря-вода, оскільки останній використовує тільки температуру повітря, яке є значно холоднішим джерелом.

Один із виробників [3] заявляє, що технологія Energiezaun дозволяє використовувати систему опалення з найвищим рівнем ефективності без необхідності вмикати додаткове, витратне джерело тепла в особливо холодні дні. Йому суперечить [7], який засвідчує, що взимку, коли зовнішні температури низькі, щоб не встановлювати додаткове джерело тепла, енергетичний паркандооснащується траншейним теплообмінником (ТТ) (рис. 4).

Потребує дослідження шаг труб в траншейному колекторі енергетичного паркану. Очевидно, що теплообмін ґрунт – труба в траншейному теплообміннику (ТТ) енергопаркану від різняється від теплообміну в горизонтальному ґрунтовому колекторі (ГК) геотермального ТН.

Якщо в ТТ регенерація ґрунту, який прилягає до труби (активного шару), відбувається щодоби (вдень, коли в ґрунт надходить тепло інсоляції від надземної частини енергопаркану), то в геотермальних ТН з горизонтальним колектором регенерація проходить після закінчення опалювального сезону і потребує півроку. Тому шаг між трубами в траншейному теплообміннику може бути меншим, ніж в ГК.

В одному із експериментів для поодинокі труби за короточасних режимів експлуатації встановлено, що час повернення системи в початковий стан у разі кількох годинного та добового режимів експлуатації складає 1...2 години [8]. Відмічається також, що умовний коефіцієнт теплообміну між ґрунтом і поодинокі трубою лежить в межах 17.6 – 31.9 Вт/(м² · К), а розміри активного шару ґрунту коливаються від 0.015 до 0.15 м.

Фірма Viessmannу вказівках до проектування горизонтальних колекторів [9] рекомендує шаг труб 0.3 м. Але точно така тепловіддача має місце і при шагу 0.1 м (рис.5).

Рекомендації приведені для експлуатації впродовж 1800 – 2400 годин за сезон (табл. 2). Очевидно, що

Таблиця 2. Тепловіддача ґрунту для горизонтальних колекторів [9]

Тип ґрунту	Тепловіддача, Вт/м ²	
	1800 год	2400 год
Сухий	10	8
Вологий	20 – 30	16 – 24

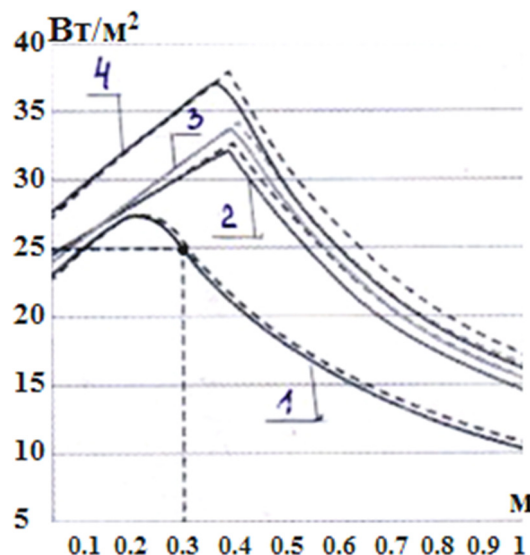


Рис. 5. Залежність максимальної тепловіддачі, Вт/м², від типу ґрунту і шагу між трубами: 1 – пісок; 2 – глина; 3 – іл; 4 – піщаник. Суцільна лінія – D 20, пунктирна – D 25

при добовому або напівдобовому режиму експлуатації шаг може бути зменшений до 0.1 м.

Рекомендації фірм-виробників енергетичних парканів не мають конкретної прив'язки до умов, за яких вони отримані, і тому використовувати їх можливо лише орієнтовно (наприклад, [3]: підземна частина енергетичного паркану глибиною 0,5 м та площею 7,5 м² забезпечує теплову потужність 1 кВт).

Очевидно, що проблема потребує багатофакторного експериментального дослідження.

4. Постановка завдання. Поставлено задачу для умов м. Одеси розрахувати первинний контур повітряного ТН з використанням технології Energiezap. Необхідно визначити поверхню трубного реєстру і встановити, чи достатньою є теплоакumuлююча здатність ґрунтової траншеї, тобто чи є потреба в додатковому джерелі тепла.

5. Основний матеріал і результати. Розрахунок проведемо для теплового навантаження 1 кВт. Діаметр труби паркану $d_{\text{тр}} = 20 \times 2$ мм, довжина труби $l = 14$ м (секція паркану в [3]). Швидкість теплоносія (водний розчин пропіленгліколю з температурою замерзання $t_{\text{зам}} = -10^\circ\text{C}$) приймаємо:

Режим течії ($v_{\text{ТН}} = 0.5$ м/с) є ламінарним: $Re_{\text{ТН}} = \frac{v_{\text{ТН}} \cdot d_{\text{тр}}}{\nu_{\text{ТН}}} = 1333$. Для ламінарного режиму інтенсивність теплопередачі визначається залежністю [10]:

$$Nu_{\text{ТН}} = 1,55 \left(\frac{Re_{\text{ТН}} \cdot Pr_{\text{ТН}}}{\frac{l}{d_{\text{тр}}}} \right)^{\frac{1}{3}} \left[1 + 0,01 \left(\frac{Re_{\text{ТН}}}{\frac{l}{d_{\text{тр}}}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] = 6.64,$$

де $Pr_{\text{ТН}} = \frac{\mu_{\text{ТН}} \cdot c_p}{\lambda_{\text{ТН}}} = 52$.

Звідси коефіцієнт тепловіддачі дорівнюватиме $\alpha_{\text{ТН}} = \frac{Nu_{\text{ТН}} \cdot \lambda_{\text{ТН}}}{d_{\text{тр}}} = 195$ Вт/м²К.

Тепловіддача зовні відповідає крапельній конденсації на горизонтальній трубі [11]:

$$\alpha_{\text{зов}} = 0,728 \frac{A}{\sqrt[4]{d_{\text{з.тр}} \cdot \Delta t}}, \quad A = \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot r \cdot q(\rho' - \rho'')}{\nu}}.$$

Прийmemo температуру поверхні труби, на якій відбувається крапельна конденсація, 0°C . Тут $\lambda' = 0.56$ Вт/м · К; $\rho' = 999.9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\nu' = 1.789 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho'' = 0.00485 \text{ кг/м}^3$; $r = 2501$ кДж/кг. Тоді $A = 1246$ і $\alpha_{\text{зов}} = 1613$ Вт/м²К.

Коефіцієнт теплопередачі:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{зов}}} + \frac{\delta_{\text{тр}}}{\lambda_{\text{тр}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ТН}}}} = 87.5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Поверхня теплообміну становитиме $F = \frac{Q_0}{k \cdot \Delta t}$. Для питомої холодопродуктивності $Q_0 = 1$ кВт і температурного напору $\Delta t = 5$ К маємо поверхню: $F_{\text{пит}} = 2.29 \text{ м}^2$. Їй відповідає довжина труби $l_{\text{пит}} = \frac{F_{\text{пит}}}{f_{\text{пм}}} = 36.3 \text{ м/кВт}$.

Для теплового навантаження $Q=11.5$ кВті холодопродуктивності $Q_o = 9.0$ кВт довжина труб паркану буде:

$$L = Q_o \cdot l_{\text{пит}} = 326.7 \text{ м}$$

Якщо секція паркану має довжину 14 м, то кількість труб в секції становить $n = 23$ труби. При висоті паркану $H = 1.5$ м крок між трубами дорівнюватиме $s = H/n = 65$ мм.

Шар інію, що утворився, збільшує поверхню теплопередачі, створює додаткову шорсткість поверхні, і коефіцієнт теплопередачі зростає.

При подальшому зростанні інію збільшується створюваний ним додатковий опір теплопередачі, і коефіцієнт теплопередачі знижується. Залежність коефіцієнту теплопередачі від товщини шару інію щоразу треба встановлювати експериментально [12].



Рис. 6 Надземна частина енергетичного паркану

Висновки. Як видно, $Q_1 > Q_o$. Отже, система опалення з крижаним акумулятором тепла здатна працювати в моновалентному режимі. На випадок пікових тепловантажень, коли температура зовнішнього повітря буває нижчою за середньомісячну (таке трапляється кожні 12 років), буферна ємність системи комплектується електронагрівальною вставкою

Література:

1. <https://www.mitsubishi-aircon.ua>.
2. Техпаспорт Octopus - OctopusABEnergi. Box 161. 243 23 Höör, Sverige (Швеція)
3. HauteC_2021_01_08_Energiezaun_Aufstellung: www.hautec.eu
4. https://www.tab.de/artikel/tab_Energiezaun_1822594.html
5. <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/schlemmer-gmbh/Schlemmer-Energiezaun-zu-100-Prozent-effizient/boxid/617180>
6. https://www.tab.de/artikel/tab_Energiezaun_1822594.html
7. <https://www.kesselheld.de/energiezaun/>
8. Пуховий І. І. Експериментальні дослідження теплообміну з ґрунтом в ґрунтових колекторах – Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 3, С. 60 – 63
9. Руководство по проектированию Viessmann 2012.
10. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.П. Иванов и др.; Под общ. ред. д-ра техн. наук Г. Н. Даниловой. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 303 с.
11. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М., «Энергия», 1977. – 344 с.
12. <https://www.activestudy.info/sistemy-otivaniya-vozduxoxladitelej>

Demyanenko Y.I., Glauberman M.A.

Variants of design solutions for the primary circuit of air-to-water heat pumps for heat supply schemes of private residential buildings

SUMMARY

The article discusses options for arranging the primary circuit of air-to-water heat pumps. From the point of view of capital costs and construction time, the air-to-water heat pump is the most profitable. However, it has a significant drawback: a drop in heat output when the outside air temperature decreases, precisely when the need for heat increases. To cover peak heat loads, the heating system is equipped with a redundant heat source - usually an electric heating unit.

The search for ways to eliminate or significantly reduce the dependence of the heat output of air heaters on the outside air temperature is represented by three variants of the evaporator design of an air-to-water heat pump: with a 'classical' heat exchanger in the form of copper tubes with aluminium fins and forced air movement by means of a fan; with a vertical copper-tube heat exchanger with aluminium fins and free air movement - Octopus; and with a heat exchanger in the form of a manor fence - a single-row pipe regime made of polyethylene pipes (German technology Energiezaun).

Calculations of the surface of the energy fence for a residential building in Odesa are presented.

Key words: *evaporator of the air-to-water heat pump, primary circuit of the heat pump, copper pipes with aluminium plate fins, copper pipes with aluminium fin fins, energy fence.*