

УДК 662.9

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦІЇ БУДІВЕЛЬ ЗАКЛАДІВ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я З МЕТОЮ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

Кандидати техн. наук, Ю. О. Півненко, Ю. О. Бурда, Ю. І. Чайка, Р. Б. Ткаченко,
д-р техн. наук І. О. Редько

ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF NAPHTHALENE CONTENT IN COKE OVEN GAS ON TEMPERATURE AND PRESSURE

PhD (Tech.) Y. O. Pivnenko, PhD (Tech.) Y. O. Burda, PhD (Tech.) Y. I. Chaika,
PhD (Tech.) R. B. Tkachenko, Dr. Sc. (Tech.) I. O. Redko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336332>



Анотація. У статті розглянуто доцільність впровадження теплових насосів типу «повітря-вода» в системи вентиляції будівель закладів охорони здоров'я з метою зниження енергоспоживання. Зважаючи на обмеження ДБН В.2.2-10:2022 щодо застосування рекуператорів у приміщеннях із постійним перебуванням пацієнтів, автори досліджують альтернативний підхід для утилізації теплоти витяжного повітря. Проаналізовано реальні об'єкти: амбулаторія в м. Дергачі, лікарня в м. Ізюм Харківської області. Результати свідчать про енергетичну ефективність і потенціал широкого впровадження запропонованого рішення в медичних закладах.

Ключові слова: тепловий насос, вентиляція, енергоефективність, охорона здоров'я, утилізація тепла, витяжне повітря, опалення, припливне повітря, рекуперація, будівлі.

Abstract. This article investigates the possibility of integrating air-to-water heat pump systems into the ventilation infrastructure of healthcare facilities with the aim of reducing total energy consumption. Modern supply and exhaust ventilation systems often incorporate heat recovery units such as rotary or plate recuperators, which are effective in general construction practice. However, the Ukrainian national standard DBN B.2.2-10:2022 «Healthcare Facilities. General Provisions» restricts the use of such devices in rooms with permanent patient occupancy due to sanitary and epidemiological considerations. This regulatory constraint creates a challenge in designing energy-efficient ventilation systems for hospitals and outpatient clinics. In this context, the use of heat pump systems that extract thermal energy from exhaust air and transfer it to support space heating and preheating of supply air presents a viable alternative. The paper presents the analysis of three healthcare buildings located in Kharkiv region: an outpatient clinic in Derhachi and hospital in Izium. For each case, the feasibility of using exhaust air as a heat source for the heat pump is assessed, along with its contribution to reducing the building's overall heating demand. Technical and economic indicators are evaluated, and the advantages and limitations of such systems are discussed. The results demonstrate that, under certain conditions, heat pumps can ensure both compliance with hygienic standards and significant energy savings. The proposed approach contributes to the development of sustainable engineering solutions for modernizing healthcare infrastructure, especially in regions with moderate climates and high energy costs.

Keywords: heat pump, ventilation, energy efficiency, healthcare, heat recovery, exhaust air, heating, supply air, recuperation, buildings.

Вступ. Сучасні системи припливно-
витяжної вентиляції майже завжди

обладнані системами утилізації тепла
витяжного повітря із застосуванням

роторних або пластинчастих рекуператорів. Такі системи набули найбільшого розповсюдження з новим будівництвом, реконструкцією та капітальним ремонтом будівель різного призначення.

ДБН В.2.2-10:2022 «Заклади охорони здоров'я. Основні положення» є основним нормативним документом для проектування і будівництва закладів охорони здоров'я. Так, пунктом 12.2.17 цього ДБН дозволено застосовувати пластинчасті та роторні рекуператори для окремих категорій приміщень, однак у приміщеннях із постійним перебуванням пацієнтів застосування подібних рекуператорів заборонено.

Втрати тепла з витяжним повітрям можуть бути найбільшими серед усіх видів тепловтрат будівлі закладу охорони здоров'я. У роботі буде розглянуто можливість застосування теплових насосів типу «повітря-вода» з використанням як утилізованого середовища витяжного повітря для забезпечення потреб системи опалення та нагрівання припливного повітря на прикладі об'єктів будівель амбулаторії в м. Дергачі, лікарні в м. Ізюм Харківської області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна література підтверджує перспективність використання теплових насосів (ТП) для енергоефективного опалення і вентиляції будівель. Так, у статті [1] автори досліджували повітряний тепловий насос «повітря-вода» LG Therma V і виявили, що його коефіцієнт трансформації COP залишається високим за помірного зниження зовнішньої температури (наприклад до -7°C) і ефективно забезпечує низькотемпературні системи опалення (до $\sim 55^{\circ}\text{C}$ на виході). Однак у медичинських закладах через жорсткі санітарні вимоги рекуперація теплоти у звичайних повітрообмінних системах обмежена.

В умовах пандемії дослідники звернули увагу на комбіновані рішення. У моделях Шибуоли й Тамбані змодельовані дві альтернативні системи вентиляції:

«звичайний» рекуператор (HRV) і тепловий насос, що використовує витяжне повітря (ЕАНР). Система HEAHU (комбінація рекуператора і ЕАНР) продемонструвала значні енергозбереження: від 31 до 46 % за різних кліматичних умов порівняно з використанням тільки теплообмінника [2]. Навіть суто ЕАНР-система (без рекуператора) у помірному кліматі показала економію 2.5–48 % енергії. Висновок авторів – теплообмінники з додатковим тепловим насосом можуть істотно підвищити ефективність повітрообміну для високих кратностей вентиляції [2]. Суттєвим обмеженням цих робіт є те, що вони базовані на імітаційному моделюванні, без експериментального тестування в реальних умовах лікарень; зокрема, не розкрито питання фізичної ізоляції потоків повітря.

Широкомасштабне моделювання Аалтоського університету (Liu et al.) сфокусоване безпосередньо на лікарнях. Використано програму IDA ICE для імітації госпітальної будівлі у фінському кліматі. Дослідники оцінювали комбіновані системи: традиційні рунераунд-рекуператори разом із витяжним ТП (ЕАНР) і фотогальванічними панелями. За оптимальної конфігурації 71 % опалювального навантаження будівлі і 92 % навантаження на підігрів вентиляційного повітря покривало утилізоване тепло з вентиляції [3]. Порівнюючи з базовою схемою (ефективність рекуперації $\sim 46\%$), запропонована комбінація дала змогу зекономити до $\sim 16.6\%$ життєвого циклу вартості системи [3]. Водночас автори визнають високу вартість впровадження технологій (особливо баків АКЕСТ та електродних систем), а оцінювання побічних аспектів (обслуговування, безвідмовність) залишається недостатнім.

Інші дослідження на міжсекторальному рівні демонструють великий потенціал теплових насосів. Наприклад, Meyer et al. змодельовали вплив переходу на аеротермальні ТП у містах Західної Європи. Для міста Тулуза автори

показують, що заміна частини газового/електричного опалення на повітряні ТП дає змогу скоротити енергоспоживання на опалення у два-три рази (на 57–76%) [4]. У США NREL (CaraDonna) проаналізував теплові насоси у дахових кондиціонерах RTU. Впровадження роторних рекуператорів і ТП на витяжці для сучасних комерційних будівель дає ~9 % загальної економії енергії та подібне зменшення викидів CO₂ [5]. Ці роботи показують загальні вигоди ТП, але не враховують специфіку медичних об'єктів.

Нові інженерні рішення продемонстровані Liu S. et al., які запропонували компактний вентилятор з рекуперацією і петлею теплового насоса (тепловою трубою). Експеримент показав, що такий композитний пристрій у зимових умовах має EER ≈ 12.6 ($i \approx 4.8$ влітку), значно перевищуючи звичайні системи [6]. Це рішення компенсує зниження ефективності простих вентиляційних рекуператорів у холодному кліматі і забезпечує суттєву економію (до 35 % в енергоспоживанні) [6]. Проте наведені результати отримані на прототипах і в лабораторних умовах; поки не описано інженерних викликів серійного виробництва та гігієнічної сертифікації таких систем.

Слід сказати і про нормативні обмеження. За ДБН В.2.2-10:2022 «Заклади охорони здоров'я», у палатах із постійним перебуванням пацієнтів використання повітряних рекуператорів заборонено; допустимі тільки роторні (або теплоутилізатори першої категорії) у допоміжних і адміністративних зонах [7]. Крім того, рекуперацію теплоти в системах із ТП дозволено лише за умови повного уникнення змішування припливного та витяжного повітря [7]. Ці норми суттєво звужують спектр технічних рішень для медичних будівель, і їх слід враховувати, проєктуючи системи вентиляції з НР.

Незважаючи на перспективність вищезгаданих розробок, багато аспектів залишаються недостатньо вивченими. Перш

за все необхідно більше емпіричних досліджень у реальних умовах лікарень: перевірки запропонованих систем ТП і рекуператорів на об'єктах з урахуванням санітарних вимог. Потрібні експерименти щодо ефективності очищення/фільтрації повітря та можливого перехресного забруднення з застосуванням ізольованих ТП-рекуператорів. Недостатньо вивчено питання оптимального управління гібридними вентиляційно-тепловими установками (регулювання теплового та повітряного потоку з урахуванням змінних навантажень і вимог до мікроклімату). Також бракує комплексних економічних оцінок і техніко-економічних моделей (з урахуванням «біоекономічного» ефекту і довгострокових інвестиційних витрат) [8, 9]. Важливо дослідити вплив повітряних ТП щодо надійності систем життєзабезпечення лікарень, зокрема, як резервувати теплоносії або живлення на випадок аварій. Отже, подальші дослідження мають бути мультидисциплінарними: поєднувати термодинаміку, санітарію і питання експлуатації.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є оцінювання доцільності та ефективності впровадження теплових насосів типу «повітря-вода» в системи вентиляції будівель закладів охорони здоров'я для зниження енергоспоживання. Дослідження сфокусовано на утилізації теплоти витяжного повітря як альтернативи традиційним рекуператорам, враховуючи обмеження, встановлені ДБН В.2.2-10:2022, що забороняють їх використання в приміщеннях із постійним перебуванням пацієнтів.

Основні завдання дослідження:

1. Проаналізувати енергетичні характеристики сучасних систем вентиляції в будівлях закладів охорони здоров'я.
2. Дослідити технічну можливість інтеграції теплових насосів типу «повітря-вода» для утилізації теплоти витяжного повітря.

3. Проаналізувати реальні об'єкти: амбулаторії в м. Дергачі та лікарні в м. Ізюм Харківської області, оцінивши їхні теплові навантаження та витрати повітря.

4. Оцінити енергетичну ефективність запропонованого рішення на основі теоретичних розрахунків і моделювання.

5. Визначити технічні та економічні переваги і обмеження впровадження теплових насосів у медичних закладах.

Основна частина досліджень

У роботі розглянуто будівлі закладів охорони здоров'я, проаналізовано споживання теплової енергії, витрати витяжного повітря та кількість тепла у витяжному повітрі, що можна утилізувати.

У табл. 1, 2 наведені основні характеристики розглянутих будівель.

Таблиця 1

Характеристика будівлі Ізюмської лікарні

Будинок			Лікарня	
Призначення			Будівля закладу охорони здоров'я	
Поверховість, тип			Три поверхи	
Площа опалювальна			3260,5	
Розташування (температурна зона)			І температурна зона	
Розрахункова температура внутрішнього повітря			22 °С	
Розрахункова температура зовнішнього повітря			-23 °С	
Графік опалення			168 год/тиждень	
Архітектурно-планувальні рішення				
Параметр	Висота, м		Площа, м ²	
	загальна	поверху	загальна	опалювальна
Значення	12	2,7	3622,8	3260,5
Розрахунковий опір теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій				
Опір теплопередачі зовнішніх стін			R _q = 2,19 м ² К/Вт	
Опір теплопередачі горищного перекриття			R _q = 4,92 м ² К/Вт	

Зовнішні стіни будівлі мають багатошарову конструкцію: внутрішня штукатурка товщиною 25 мм, цегляна кладка товщиною 510 мм, утеплювач із мінеральної вати товщиною 100 мм, повітряний зазор 75 мм і зовнішнє облицювання профільним листом С-35 товщиною 0,55 мм, закріпленим на оцинкованому каркасі. Вікна та балконні двері виготовлені з металопластику з подвійним склінням, що забезпечує тепло- та звукоізоляцію. Дах складається з двох типів конструкцій: основна частина виконана з профільованого листа, укладеного на обрешітку поверх крокв із

брусів, а також комбінована плоска покрівля, яка включає залізобетонну плиту товщиною 220 мм, пароізоляцію, шар керамзиту товщиною 160 мм, гідроізоляцію та плити з мінеральної вати товщиною 150 мм для утеплення. Підлога будівлі — це бетонна плита товщиною 100 мм без додаткового утеплення. Що стосується систем будівлі, то вона обладнана централізованою системою опалення, однак гаряче водопостачання відсутнє — нагрів води для санітарного блоку забезпечує електричний бойлер. Вентиляція в будівлі природна, без механічних систем.

Таблиця 2

Характеристика будівлі Дергачівської амбулаторії

Будинок			Амбулаторія	
Призначення			Будівля закладу охорони здоров'я	
Поверховість, тип			Два поверхи	
Площа опалювальна			846,52	
Розташування (температурна зона)			І температурна зона	
Розрахункова температура внутрішнього повітря			22 °С	
Розрахункова температура зовнішнього повітря			-23 °С	
Графік опалення			168 год/тиждень	
Архітектурно-планувальні рішення				
Параметри	Висота, м		Площа, м ²	
	загальна	поверху	загальна	опалювальна
Значення	9	3,5	971,92	846,52
Розрахунковий опір теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій				
Опір теплопередачі зовнішніх стін			R _q = 3,32 м²К/Вт	
Опір теплопередачі горищного перекриття			R _q = 8,48 м²К/Вт	

Будівля має зовнішні стіни, виконані з керамічної цегли товщиною 510 мм на клейовій суміші, утеплені системою вентильованого фасаду з мінеральною ватою товщиною 200 мм і густиною 80 кг/м³, з зовнішнім опорядженням керамогранітними панелями. Вікна та балконні двері обладнані двокамерними склопакетами з енергозберігаючими покриттями з внутрішнього та зовнішнього боку, заповненими інертним газом аргонном, і профільною системою з полівінілхлориду (ПВХ). Покрівля є суміщеним покриттям, улаштованим із залізобетонних плит перекриття товщиною 220 мм, похилоутворюючого шару полістиролбетону середньою товщиною 120 мм, цементно-піщаної стяжки товщиною 20 мм, мінераловатного утеплювача товщиною 200 мм із щільністю

135 кг/м³, ще однієї цементно-піщаної стяжки товщиною 50 мм і покриття руберойдом. Підлога влаштована по ґрунту з наявною основою, що складається з вирівнювального шару будівельного піску товщиною 200 мм, армованої бетонної основи товщиною 100 мм, шару екструдованого пінополістиролу товщиною 40 мм, цементно-піщаної стяжки товщиною 40 мм і покриття керамічною плиткою товщиною 10 мм. Інженерні системи будівлі включають централізовану систему тепlopостачання, відсутність системи гарячого водопостачання (замість цього встановлено електричний бойлер для забезпечення потреб гарячої води в санвузлі) і механічну вентиляцію.

Нижче наведена порівняльна таблиця основних показників, що будуть досліджувати (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняльна характеристика будівель

Будівля	Теплове навантаження на систему опалення, кВт	Теплове навантаження на систему вентиляції, кВт	Опалювальна площа, м ²	Питомі витрати тепла на потреби систем опалення і вентиляції на 1 м ² опалювальної площі, Вт/м ²	Витрати витяжного повітря, м ³ /год
Амбулаторія	23,97	42,59	846,52	85,72	1265
Лікарня	138,86	193,52	3260,5	101,94	5749

Для побудови моделі скористаємося законом збереження енергії та класичною формою рівняння теплопередачі. Позначимо температури повітря на вході та виході випарника як $T_{\text{вх}}$ і $T_{\text{вих}}$ відповідно, а температуру кипіння холодоагенту – $T_{\text{кип}}$. Масові витрати повітря – $\dot{m}$, питома теплоємність повітря – c_p , площа теплообміну – A , загальний коефіцієнт теплопередачі випарника – U . У стаціонарному режимі тепло, яке віддає повітря, дорівнює теплу, яке поглинає холодоагент. З балансу енергії для повітря маємо

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}). \quad (1)$$

Одночасно для теплообмінника справедливо класичне співвідношення

$$\dot{Q} = UA \Delta T_{\text{LM}}, \quad (2)$$

де ΔT_{LM} – логарифмічна середня різниця температур гарячого і холодного потоків.

У нашому випадку холодний бік (холодоагент) є майже ізотермічним за температури $T_{\text{кип}}$, а повітря поступає за температури $T_{\text{вх}}$ і виходить за температури $T_{\text{вих}}$. Логарифмічна середня різниця дорівнює

$$\Delta T_{\text{LM}} = \frac{(T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) - (T_{\text{вих}} - T_{\text{кип}})}{\ln \frac{T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}}{T_{\text{вих}} - T_{\text{кип}}}}. \quad (3)$$

Рівняння (2) і (3) дають дві вирази для тієї самої величини $\dot{Q}$. Прирівняємо їх:

$$\dot{m} c_p (T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}) = UA \frac{(T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) - (T_{\text{вих}} - T_{\text{кип}})}{\ln \frac{T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}}{T_{\text{вих}} - T_{\text{кип}}}}. \quad (4)$$

Це трансцендентне рівняння відносно $T_{\text{вих}}$. Його можна розв'язати, скориставшись припущенням, що холодоагент залишається за сталої температури кипіння (еквівалент – один флюїд із нескінченною теплоємністю). У такому разі за методом $\varepsilon - N_T U$ (що дає ту

саму залежність) ефективність теплообміну становить

$$\varepsilon = 1 - \exp(-N_t u), \quad (5)$$

якщо $C_r = 0$, де $N_t u = UA / (\dot{m} c_p)$.
Тоді

$$\dot{Q} = \varepsilon m \dot{c}_p (T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) = m \dot{c}_p (T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) \left[1 - e^{-\frac{UA}{m \dot{c}_p}} \right]. \quad (6)$$

І нарешті, з виразу (1) впливає експоненційний розв'язок для вихідної температури повітря:

$$T_{\text{вих}} = T_{\text{кип}} + (T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) \exp(-m \dot{c}_p UA). \quad (7)$$

Припущення і обмеження моделі: розглядаємо стаціонарний режим, ізотермічний випарник (постійна температура холодоагенту), однорідний і рівномірний потік повітря, а також сталі теплофізичні властивості (c_p , U тощо). Нехтуємо тепловими втратами в навколишнє середовище, змінами фаз і вологістю повітря. Модель не враховує можливе обмерзання випарника або часткове вирошування льоду, опір теплоперенесення сусідніх елементів тощо. У таких умовах $T_{\text{вих}}$ завжди більший за $T_{\text{кип}}$, а разом із площею A та U зростання температурної різниці між повітрям і холодоагентом визначає інтенсивність охолодження.

Коефіцієнт теплопередачі варіюється в діапазоні 30...130 Вт/м²К [11, 12]. Високі

показники коефіцієнта теплопередачі визначені теоретичними розрахунками. У цій роботі будуть прийняті більш консервативні значення $U = 50$ Вт/м²К, площа теплообміну буде прийнята 5 м².

Витрати витяжного повітря, утилізованого для запропонованих будівель, складають 1265...5749 м³/год. З метою отримання більш універсальних результатів цей діапазон буде розширено до 500...20000 м³/год.

Як робочу речовину прийнято холодоагент R410a з температурою кипіння +5 °С за тиску 7 бар.

Нижче наведено графік залежності потужності теплового насоса типу «повітря-вода» від витрат витяжного повітря за сталим значенням площі теплообміну (рис. 1).

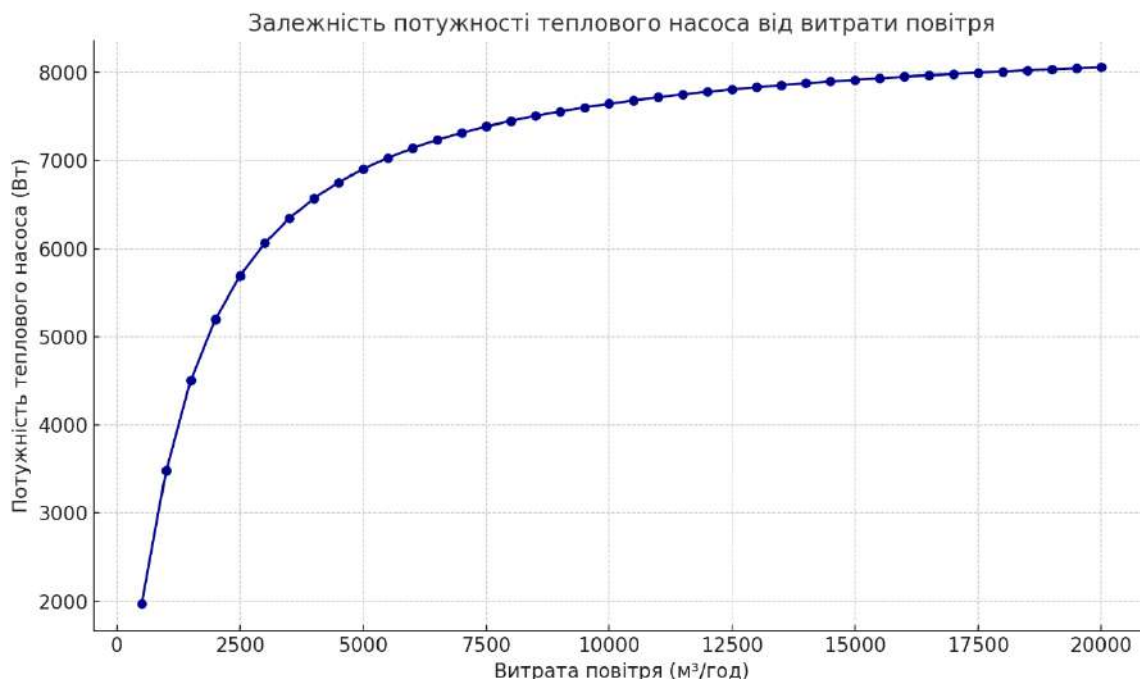


Рис. 1. Залежність потужності теплового насоса від витрат витяжного повітря

Як видно, зі збільшенням витрат повітря потужність теплового насоса зростає не лінійно, однак додатково підвищити ефективність відбору можна збільшенням площі теплообміну.

Нижче наведено графік залежності покриття теплового навантаження будівель амбулаторії і лікарні залежно від температури зовнішнього повітря (рис. 2, 3).

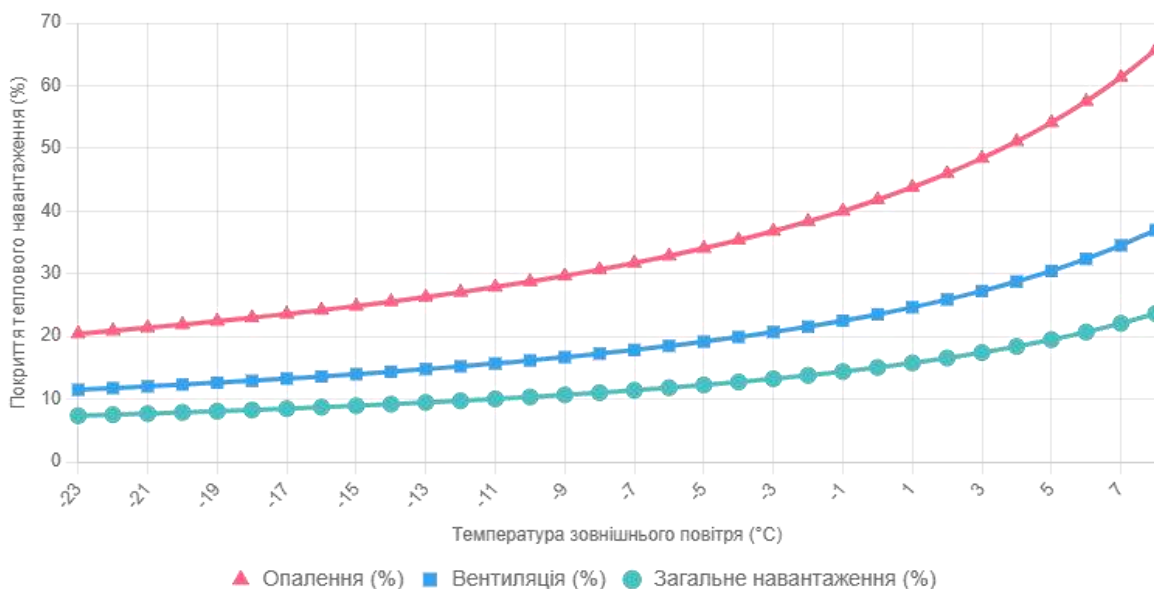
На основі наданих даних графіка залежності покриття теплового навантаження будівель амбулаторії та лікарні від температури зовнішнього повітря можна зробити кілька важливих висновків про їхню енергоефективність та особливості теплоізоляції.

Слід зазначити, що будівля амбулаторії утеплена краще, і питоме теплове навантаження на одиницю площі складає $85,72 \text{ Вт/м}^2$. Питоме навантаження для будівлі лікарні складає $101,94 \text{ Вт/м}^2$. Краща теплоізоляція амбулаторії забезпечує

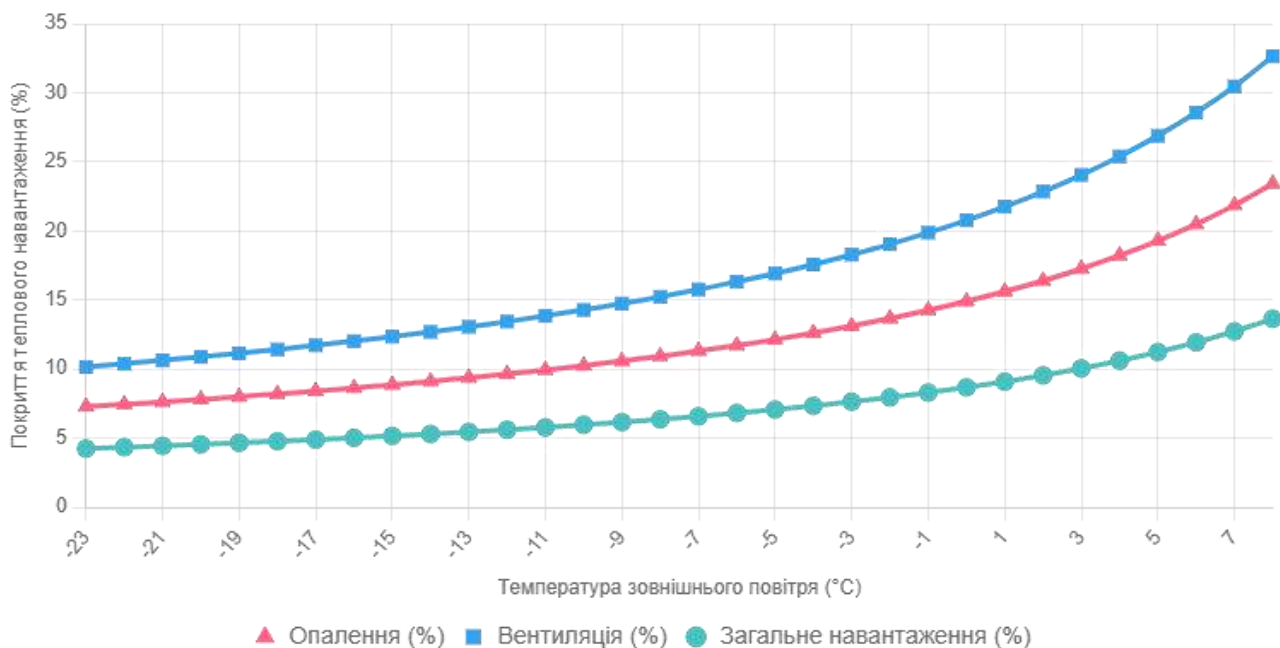
її перевагу в енергоефективності порівняно з лікарнею. Це має прямий вплив на те, як тепловий насос справляється з покриттям теплового навантаження в обох будівлях. Практично для амбулаторії тепловий насос може бути достатнім для більшості погодних умов, тоді як лікарня, імовірно, потребуватиме додаткових ресурсів у періоди пікового навантаження, коли температура зовнішнього повітря значно знижується.

Аналіз показав перспективність застосування теплових насосів із метою утилізації теплоти витяжного повітря. У роботі розглядали стандартні теплові насоси, що мають широке розповсюдження. Для досягнення високих показників утилізації є доцільними наукові дослідження щодо удосконалення теплообмінних поверхонь, застосування нових робочих речовин і схем теплових насосів.

Покриття теплового навантаження тепловим насосом залежно від температури



Покриття теплового навантаження тепловим насосом залежно від температури



3. Liu J., Ju Y., Yuan X., Kosonen R. et al. (2025). Cost-optimal dimensioning of combined run-around heat recovery and exhaust air heat pump systems in a Nordic hospital. *Journal of Building Engineering*. 106:112619.
4. Meyer D., Schoetter R., van Reeuwijk M. (2024). Energy and environmental impacts of air-to-air heat pumps in a mid-latitude city. *Nature Communications*. 15:5474.
5. CaraDonna C. et al. (2023). Heat Pump Rooftop Units With Exhaust Air Energy Recovery. *National Renewable Energy Laboratory*. NREL/TP-5500-89481.
6. Liu S., Ma G., Jia X., Xu S. et al. (2023). The thermal performance and applicability analysis of the composite ventilation system with heat recovery in ultra-low energy buildings. *Energy*. 263:125942.
7. ДБН В.2.2-10:2022. Заклади охорони здоров'я. Основні положення: затв. Наказом Мінрозвитку громад. територ. 26.12.2022 р. № 278; Наказ від 26.12.2022 № 278. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0278914-22#Text>
8. Використання теплових насосів для опалення та гарячого водопостачання будівель підприємств (на прикладі установок Heliotherm) / З. С. Сірко, В. А. Коренда, І. Ю. Вишняков та ін. (2020). *Наук. доповіді НУБіП України*. № 5(87). С.59–67.
9. Burda Y. (2025). Comprehensive analysis of thermodynamic and thermophysical processes in heat and gas supply and ventilation systems: theoretical foundations and engineering solutions: monograph. Kharkiv: O. M. Beketov NUUE, 130 p. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/68140/>.
10. Weidlich P., Yamaguchi C., Caggiano A. (2023). Retrofitting for Improving Indoor Air Quality and Energy Efficiency in the Hospital Building. *Sustainability*. 15(4):3464.
11. Brück S., Kuhn S., Bruch R. & Schmidt D. (2016). Investigations into air- and refrigerant-side heat transfer coefficients in fin-and-tube gas cooler coils. *International Journal of Refrigeration*. 67. 234–244.
12. Deng W., Feng Y. & Li R. (2018). Experimental Study of a Novel Shape-Optimized Air-to-Refrigerant Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 138. 548–558.

Півненко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, асистент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: yurii.pivnenko@kname.edu.ua. ORCID ID: orcid.org/0000-0002-6675-2649.

Бурда Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: Yurii.Burda@kname.edu.ua. orcid.org/0000-0003-3470-1334.

Чайка Юрій Іванович, кандидат технічних наук, в. о. завідувача кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: [0000-0003-1021-4662](https://orcid.org/0000-0003-1021-4662). E-mail: yurii.chaika@kname.edu.ua.

Ткаченко Роман Борисович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: [0000-0003-3899-1826](https://orcid.org/0000-0003-3899-1826). E-mail: roman.tkachenko@kname.edu.ua.

Редько Ігор Олександрович доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9863-4487>. E-mail: ihorredko1972@gmail.com.

Yurii Pivnenko, Ph.D., Assistant at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: yurii.pivnenko@kname.edu.ua. ORCID ID: [0000-0002-6675-2649](https://orcid.org/0000-0002-6675-2649).

Yurii Burda, Ph.D., Associate Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: Yurii.Burda@kname.edu.ua. ORCID ID: [0000-0003-3470-1334](https://orcid.org/0000-0003-3470-1334).

Yurii Chaika Ph.D., Head of the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: yurii.chaika@kname.edu.ua. ORCID ID: [0000-0003-1021-4662](https://orcid.org/0000-0003-1021-4662).

Roman Tkachenko, Ph.D., Associate Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: roman.tkachenko@kname.edu.ua. ORCID ID: 0009-0005-1556-0830.

Ihor Redko, D.Sc. (Doctor of Technical Sciences), Professor at the Department of Transport Technology, Design and Exploitation of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: ihorredko1972@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-9863-4487.

Статтю прийнято 13.06.2025 р.