

## ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК РЕКУПЕРАТОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ТЕПЛОНАСОСНО-РЕКУПЕРАТОРНИХ СХЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ І ПОВІТРЯНОГО ОПАЛЕННЯ

На основі аналізу результатів попередніх досліджень показано, що підвищення енергоефективності комбінованих теплонасосно-рекуператорних схем повітряного опалення і вентиляції з рециркуляцією повітря досягається в основному за рахунок ефективності роботи саме рекуператора, тобто збільшення його коефіцієнта рекуперації. Тому при вирішенні конкретних практичних задач постає питання раціонального вибору величини коефіцієнта рекуперації  $\eta_p$  рекуператора, що дозволяє підвищити енергоефективність схеми вентиляції чи опалення і водночас не перевищити прийнятні масогабаритні характеристики рекуператора. У зв'язку з цим у роботі проведено аналіз впливу основних характеристик рекуператора (коефіцієнта рекуперації і коефіцієнта тепловіддачі) на величину питомої поверхні рекуператора, яка визначає його масогабаритні характеристики та дозволяє обґрунтовано підійти до визначення меж підвищення енергоефективності теплонасосно-рекуператорних схем вентиляції і опалення за задовільних значень питомої поверхні теплообміну рекуператора, а отже, і його масогабаритних характеристик. Аналіз виконано для випадку застосування пластинчатих рекуператорів, оскільки доцільність їх використання зумовлена високою тепловою ефективністю, компактністю конструкції та значною площею теплообмінної поверхні.

**Ключові слова:** енергоефективність, повітряне опалення, вентиляція, повітряний тепловий насос, рекуператор, коефіцієнт рекуперації, коефіцієнт тепловіддачі.

### Вступ

Світове споживання енергії та відповідні викиди CO<sub>2</sub> стрімко збільшилися внаслідок зростання чисельності населення і їх прагненні комфортного життя [1, 2]. Світове кінцеве споживання енергії, зокрема у житловому секторі, у значній кількості формується потребами систем опалення, вентиляції і кондиціонування (ОВК) [3, 4]. У зв'язку з інтенсивним використанням невідновлюваних джерел енергії, обсяги яких скорочуються, все більше держав переходять на відновлювані джерела енергії (ВДЕ) [5-7].

Найважливішою проблемою нашого часу є раціональне використання природних ресурсів і застосування екологічно чистих альтернатив. Зростання потреби в енергії, тепловій чи електричній, що зумовлюється технологічним прогресом, стимулює розробку нових чи удосконалення існуючих технологій [8]. Пошук інноваційних джерел енергії та способів їх застосування, що покращать стан навколишнього середовища й зменшать використання традиційних енергоресурсів, є наразі основним завданням людства [8-10].

Одним з найбільш ефективних рішень є впровадження теплонасосних систем. Тепловий насос, замість генерації теплоти, лише переносить її з зовнішнього середовища, таким чином значно зменшуючи споживання первинної енергії порівняно зі звичайними системами [11]. Особливу увагу і значення мають ТН типу «повітря-повітря», зокрема, у вентиляційних системах, на об'єктах з великими об'ємами приміщень [12]. Завдяки малій різниці температур у робочому циклі, забезпечується високий рівень енергоефективності у системах ОВК. Адже ТН здатні брати теплоту з витяжного вентиляційного повітря як стабільного джерела енергії [11].

Однак, при суттєвому зниженні температури навколишнього середовища коефіцієнт трансформації теплоти повітряного теплового насоса значно зменшується. Через це постає потреба у використанні більш складних схем, наприклад, поєднання теплонасосної установки з рекуператором (теплообмінник повітря-повітря, рис. 1), що у свою чергу підвищить ефективність опаловально-вентиляційних систем [11, 13].

Але дієвість таких схем також залежить і від характеристик самого рекуператора. Тип теплообмінника, різниця температур, об'ємні витрати повітря, аеродинамічний опір та інші показники значною мірою впливають на те, наскільки ефективно відпрацьоване повітря віддає теплоту свіжому (припливному) повітрю, тим самим зменшуючи навантаження на систему опалення чи ТН. Усе це узагальнює коефіцієнт рекуперації  $\eta_p$ , що є основним показником продуктивності даного теплообмінника.

Виходить, що характеристики рекуператора є ключовими факторами, які прямо впливають на термодинамічну ефективність усієї системи [14-16].

Таким чином, нагальною науково-практичною проблемою є аналіз впливу властивостей рекуператора на енергоефективність теплонасосно-рекуператорних систем вентиляції та повітряного опалення з метою пошуку умов максимального зменшення витрат енергії.

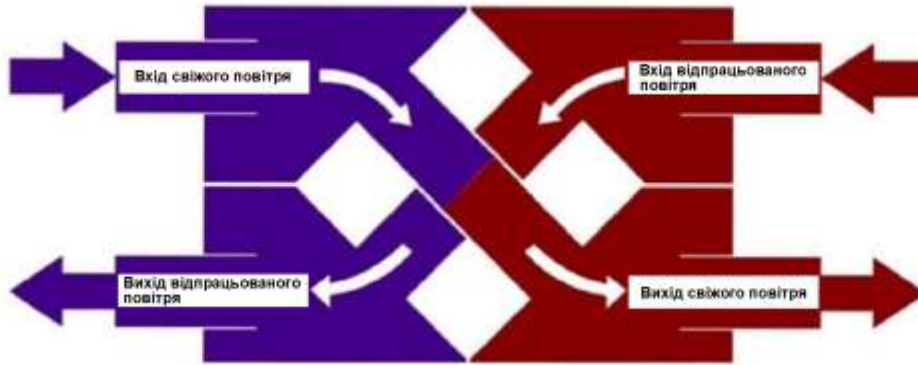


Рисунок 1 – Схема теплообмінника повітря-повітря

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У останні роки системи повітряного опалення й вентиляції стають дедалі популярнішими. Значна частина досліджень присвячена комбінованим теплонасосно-рекуперативним схемам, які утилізують теплоту витяжного повітря. Водночас у літературі недостатньо розглянуто кількісну оцінку енергоефективності таких систем, що вимагає чіткого визначення [11].

Ключові публікації [17, 18] досліджують комплексні системи повітряного обігріву й вентиляції, які складаються з теплового насоса, рекуператора і механізму часткової рециркуляції відпрацьованого повітря. Одним із ключових питань в оптимізації такої схеми є вибір місця для камери змішування (КЗ) потоків рециркульованого та свіжого повітря. Тому розглянуто два варіанти поєднання обладнання (рис. 2).

Автори дослідження встановили, що найбільша енергоефективність досягається при розташуванні камери змішування перед конденсатором ТН. Порівняно з іншим варіантом, дана схема забезпечує більш сприятливі температурні умови роботи теплового насоса. Також результати аналізу ефективності використання теплоти підтвердили, що рекуперация, порівняно з простою рециркуляцією, значно покращує умови роботи випарника ТН.

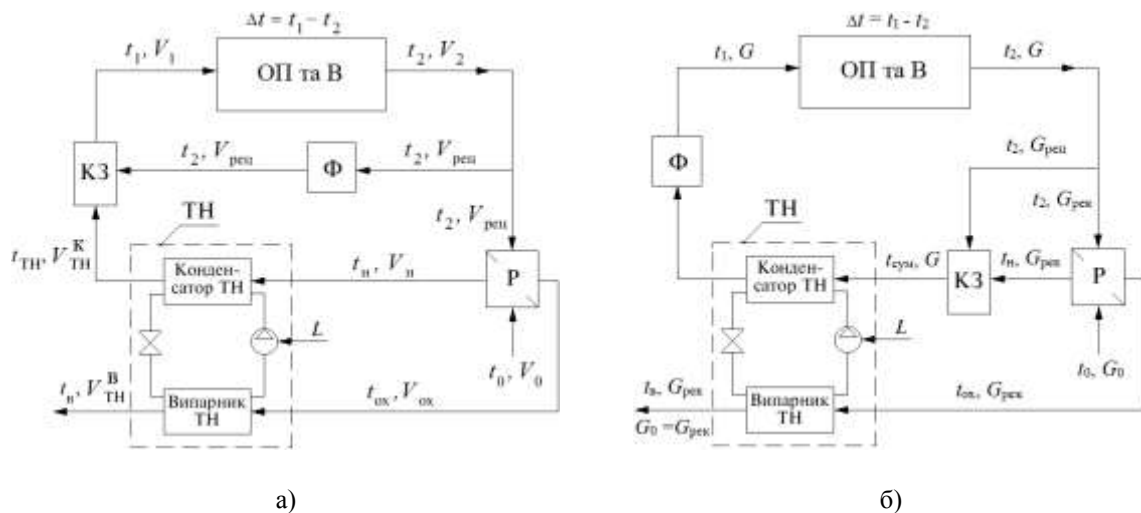


Рисунок 2 – Схема з частковою рециркуляцією та розміщенням камери змішування а) після конденсатора ТН; б) перед конденсатором ТН: ОП та В – об'єкт опалення та вентиляції; ТН – тепловий насос; Р – рекуператор; Ф – фільтр; КЗ – камера змішування [17, 18]

Коефіцієнт використання зовнішньої енергії на ТНС опалення та вентиляції з використанням рекуператора теплоти та рециркуляцією відпрацьованого повітря за схемою зображеною на рисунку 2а, визначено в роботі [11] і має вигляд

$$l_{\text{оп+вент}} = \frac{(1 - K_{\text{рец}})(t_2 - \eta_p(t_2 - t_0) - t_b)}{(\varphi - 1)(t_2 + \Delta t - t_0)},$$

де  $K_{\text{рец}}$  – коефіцієнт рециркуляції;  $\varphi$  – дійсний коефіцієнт трансформації ТН;  $\eta_p$  – коефіцієнт рекуперації;  $t_2, t_0, t_b$  – температури повітря на виході з приміщення, навколишнього повітря та на виході з випарника ТН відповідно, °С;  $\Delta t$  – перепад температур повітря, на вході та виході з приміщення, °С.

Відповідно коефіцієнта використання зовнішньої енергії ТНС повітряного опалення та вентиляції наведеній на рисунку 2б, визначено в роботі [18] і має вигляд

$$l_{\text{оп+вент}} = \frac{(1 - K_{\text{рец}})(t_{\text{ок}} - t_b)}{(\varphi - 1)(t_n - t_0)(K + 1)},$$

де  $t_{\text{ок}}, t_n$  – температури повітря на виході з рекуператора та повітря в приміщенні відповідно, °С;  $K$  – коефіцієнт пропорційності, який представляє собою відношення витрат теплоти на опалення до вентиляції.

Із вище наведених формул випливає, що при заданих температурах в вузлових точках теплонасосно-рекуператорних схем вентиляції і повітряного опалення енергоефективність цих схем залежить як від коефіцієнта трансформації  $\varphi$  теплового насоса, так і від основної характеристики рекуператора, тобто від його коефіцієнта рекуперації  $\eta_p$ . При цьому, відповідно до результатів робіт [17, 18], лише за низьких значень  $\eta_p$  додаткове використання рециркуляції забезпечує позитивний ефект, а при високих значеннях  $\eta_p$ , схема з рециркуляцією (рис. 2а) поступається за ефективністю простішій системі, що працює лише з рекуператором.

Однак, підвищення енергоефективності схеми за рахунок збільшення коефіцієнта рекуперації  $\eta_p$  тягне за собою негативний наслідок, пов'язаний зі зростанням необхідної поверхні теплообміну рекуператора, а значить, до збільшення його масогабаритних характеристик, і відповідно до додаткових матеріальних затрат. Тому, при вирішенні конкретних практичних задач, постає питання раціонального вибору величини  $\eta_p$  рекуператора, що дозволяє підвищити енергоефективність схеми вентиляції чи опалення і разом з тим не перевищити прийнятні масогабаритні характеристики рекуператора. При вирішенні цього питання враховано те, що різні конструкції рекуператорів мають свої особливості, які ускладнюють розробку загального підходу вирішення поставленого питання. Тому, нижченаведений аналіз виконано для випадку застосування пластинчатих рекуператорів, оскільки доцільність їх використання зумовлена високою тепловою ефективністю, компактністю конструкції та значною площею теплообмінної поверхні [13-16].

В зв'язку з цим нижче наведено аналіз впливу основних характеристик пластинчатих рекуператорів (коефіцієнта рекуперації і коефіцієнта тепловіддачі) на їх питому поверхню теплообміну, завдяки яким можна оцінити вплив даних показників не тільки на енергоефективність системи, а і на її конструктивні характеристики.

#### Мета та завдання

Метою даної роботи є дослідження впливу характеристик пластинчастого рекуператора (коефіцієнта рекуперації  $\eta_p$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$ ) на величину питомої поверхні теплообміну рекуператора, що може забезпечити в подальшому комплексний аналіз і оптимізацію енергетичних і матеріальних затрат при реалізації теплонасосно-рекуператорних схем вентиляції і повітряного опалення.

#### Матеріали і результати досліджень

Як показують попередні дослідження енергоефективність теплонасосно-рекуператорних схем залежить окрім інших параметрів від коефіцієнта рекуперації рекуператора  $\eta_p$ . Тому постає проблема у забезпеченні високого значення  $\eta_p$ .

В основі розрахунку будь-якого рекуператора є два рівняння:

1) рівняння теплопередачі

$$Q = kF\Delta t, \quad (1)$$

де  $Q$  – тепловий потік, який передається через поверхню, Вт;  $F$  – площа теплопередаючих стінок рекуператора, м<sup>2</sup>;  $k$  – середній коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t$  – середня різниця температур між теплоносіями, К.

2) рівняння теплового балансу:

$$Q = G_1 c_p (t_1 - t_{\text{ок}}) = G_2 c_p (t_n - t_0), \quad (2)$$

де  $G_1, G_2$  – масові витрати відпрацьованого і свіжого повітря, кг/с;  $c_p$  – масова питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);  $t_1$  – температура відпрацьованого повітря на вході в рекуператор, °С;  $t_{\text{ок}}$  – температура

охолодженого відпрацьованого повітря, °C;  $t_n$  – температура нагрітого свіжого повітря на виході з рекуператора, °C;  $t_o$  – температура навколишнього середовища, °C.

Шуканою величиною у даному дослідженні є поверхня теплообміну  $F$ .

Якщо  $G_1 = G_2 = G$ , то прирівнявши рівняння (1) та (2) вийде:

$$\frac{F}{G} = \frac{c_p(t_1 - t_{ox})}{k\Delta t} \quad \text{або} \quad \frac{F}{G} = \frac{c_p(t_n - t_o)}{k\Delta t}, \quad (3)$$

де  $\frac{F}{G}$  – питома поверхня рекуператора на одиницю витрати повітря,  $\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{кг}$ .

Треба визначити залежність цієї величини від характеристики рекуператора  $\eta_p$ . Для цього величини  $t_{ox}$ ,  $t_n$ ,  $\Delta t$  треба виразити через  $\eta_p$ .

$$t_{ox} = t_1 - \eta_p(t_1 - t_o), \quad (4)$$

$$t_n = t_1 - (1 - \eta_p)(t_1 - t_o). \quad (5)$$

Отже, середня різниця температур між теплоносіями з урахуванням виразів (4) та (5), буде мати вигляд

$$\Delta t = \frac{t_1 + t_{ox}}{2} - \frac{t_n + t_o}{2} = (t_1 - t_o)(1 - \eta_p). \quad (6)$$

Коефіцієнт теплопередачі рекуператора має вигляд:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (7)$$

Величиною термічного опору  $\frac{\delta}{\lambda}$  металевої стінки рекуператора в виразі (7) можна знехтувати. Тоді, за умови, що  $G_1 = G_2$ , для пластинчатого рекуператора можна прийняти  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{пов}$ , а вираз для коефіцієнта теплопередачі приймає вигляд

$$k = \frac{\alpha_{пов}}{2}. \quad (8)$$

Звідси виходить, що шукана залежність (3) спрощується до виразу:

$$\frac{F}{G} = \frac{2c_p\eta_p}{\alpha_{пов}(1 - \eta_p)}. \quad (9)$$

Таким чином, відношення (3) для визначення питомої поверхні рекуператора на одиницю витрати повітря є функцією тільки двох величин  $\eta_p$  і  $\alpha_{пов}$ :

$$\frac{F}{G} = f(\eta_p, \alpha_{пов}). \quad (10)$$

На рис. 3 і 4 показані залежності величини  $F/G$  від характеристик рекуператора  $\eta_p$  і  $\alpha_{пов}$  в практично важливих діапазонах зміни цих величин.

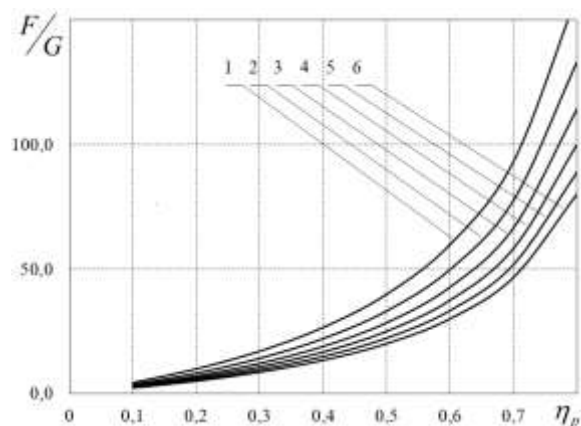


Рисунок 3 – Графік залежності питомої поверхні рекуператора на одиницю витрати повітря  $F/G$  від коефіцієнта рекуперативності  $\eta_p$  для різних значень коефіцієнта теплопередачі:

1-6  $\alpha_{пов} = 50; 60; 70; 80; 90; 100 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ .

Графік на рис.3 показує, що для всіх значень коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{\text{пов}}$  зі зростанням коефіцієнта рекуперації  $\eta_p$  необхідна питома поверхня рекуператора різко збільшується, особливо при переході до високих значень (понад 0,6 – 0,7). Водночас за більших значень коефіцієнта тепловіддачі криві розташовані нижче, тобто для досягнення одного й того самого коефіцієнта рекуперації потрібна менша площа теплообміну. Це наочно демонструє, що інтенсифікація тепловіддачі дозволяє суттєво зменшити габарити рекуператора при збереженні високої ефективності рекуператора.

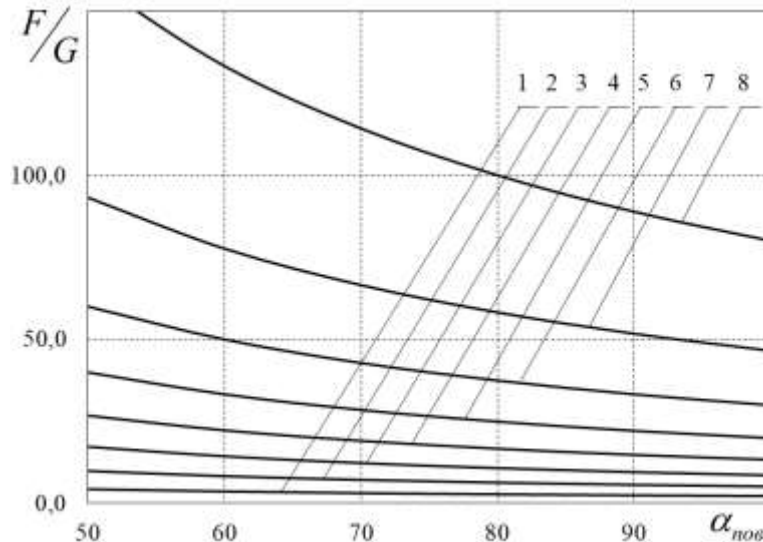


Рисунок 4 – Графік залежності питомої поверхні рекуператора на одиницю витрати повітря  $F/G$  від коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{\text{пов}}$  для різних значень коефіцієнта рекуперації:  
1-8  $\eta_p = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ .

Графік на рис.4 наочно ілюструє залежність питомої поверхні рекуператора на одиницю витрати повітря від коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{\text{пов}}$  для різних значень коефіцієнта рекуперації  $\eta_p$ . Звертає на себе увагу те, що вплив коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{\text{пов}}$  на величину питомої поверхні теплообміну особливо великий при високих значеннях коефіцієнта рекуперації  $\eta_p$ , який забезпечує високу енергетичну ефективність схеми вентиляції чи опалення. Таким чином, графік підтверджує, що підвищення інтенсивності теплообміну є ключовим шляхом зменшення поверхні рекуператора, особливо при проектуванні високоефективних систем з великими значеннями коефіцієнта рекуперації.

#### Висновки:

Наведені в даній роботі результати аналізу дозволяють сформулювати наступні висновки.

1. Показано, що енергетична ефективність теплонаосно-рекуператорних схем вентиляції і повітряного опалення в значній мірі залежить від однієї з основних характеристик рекуператора, а саме його коефіцієнта рекуперації  $\eta_p$ . Однак в відомих роботах немає рекомендацій щодо вибору його значень.

2. Показано, що підвищення енергетичної ефективності розглянутих схем вентиляції і опалення за рахунок збільшення коефіцієнта рекуперації рекуператора заходиться в протиріччі з впливом цього коефіцієнта на величину питомої поверхні теплообміну рекуператора, а значить, на його масогабаритні характеристики.

3. Наведені результати обчислень наочно ілюструють вплив коефіцієнтів рекуперації  $\eta_p$  та тепловіддачі  $\alpha_{\text{пов}}$  на величину питомої поверхні теплообміну рекуператора, що дозволяє зробити вибір раціональних значень коефіцієнта рекуперації, який в свою чергу забезпечує високу енергетичну ефективність схеми вентиляції чи опалення при задовільних значеннях питомої поверхні теплообміну рекуператора, а значить його масогабаритних характеристик.

4. Подальші напрямки досліджень доцільно пов'язати з розширенням аналізу на інші типи рекуператорів з урахуванням аеродинамічних втрат та реальних режимів роботи систем, а також із розробкою методів комплексної оптимізації, що одночасно враховують енергетичні, економічні та конструктивні параметри. Перспективним є також дослідження впливу змінних кліматичних умов і режимів експлуатації на ефективність систем, а також інтеграція отриманих моделей у системи автоматизованого керування вентиляцією.

**Список використаної літератури**

1. Kadir Amasyali, Nora M. El-Gohary A review of data-driven building energy consumption prediction studies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81 (2018) 1192-1205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.095>
2. European Commission (2022), REPowerEU Plan [Електронний ресурс] // Режим доступу – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>
3. Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-Energy-Policies-in-a-Time-of-Transition-Heating-and-Cooling>
4. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2013. 240 с.
5. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Textoku>
6. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text>
7. Мисак С., Шаповал С. та Хивлюд А. (2024). Аналіз частки відновлюваних джерел енергії у валовому кінцевому енергоспоживанні країн Європи. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 78 (1), 59-75. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.05>
8. Басок Б., Дубовський С., Pastushenko E., Нікітін Є., & Базєєв Є. (2023). Теплові насоси як тренд низьковуглецевого розвитку енергетики. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 75(2), 23-44. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.02>
9. International Energy Agency [Електронний ресурс] // Режим доступу – <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
10. European Heat Pump Association (EHPA) [Електронний ресурс] // Режим доступу – <http://www.ehpa.org/>
11. Безродний М.К., Притула Н.О. Енергоефективність теплонасосних схем опалення, вентиляції і кондиціонування: монографія / М.К. Безродний, Н.О. Притула. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во “Політехніка”, 2023, 528 с.
12. Fabian Ochs, Martin Hauer, Michele Bianchi Janctti, Siegele Dietmar Energy Performance of Membrane Energy Recovery Ventilation in Combination with an Exhaust Air Heat Pump. Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA, Aug. 7-9, 2017, pp. 1121-1130. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.293>
13. Sonam Jangid. " Plate Type Heat Exchanger – A Review Study. I IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), vol. 08, no. 10, 2018, pp. 11-18.
14. Mancini, R. (2019). Design and Performance Analysis of Plate Heat Exchangers for Heat Pumps using Pure and Mixed Refrigerants (PhD thesis). Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark.
15. Bhuiyan, A. A., & Sadrul Islam A. K. M. (2016). Thermal and hydraulic performance of finned-tube heat exchangers under different flow ranges: A review on modeling and experiment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 38–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.022>
16. Qasem, N. A. A., & Zubair, S. M. (2018). Compact and microchannel heat exchangers: A comprehensive review of air-side friction factor and heat transfer correlations. *Energy Conversion and Management*, 173, 555–601. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.104>
17. Безродний М.К. Теплонасосна система повітряного опалення та вентиляції з рекуператором теплоти і рециркуляцією відпрацьованого повітря / М.К. Безродний, Н.О. Притула, І.Ю. Опанасюк // *KPI Science News* – 2019, № 3, с. 7 – 15. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.3.175730>
18. Безродний М.К. Комбінована теплонасосна система повітряного опалення та вентиляції з рекуператором теплоти та частковою рециркуляцією відпрацьованого повітря / М.К. Безродний, Н.О. Притула, І.Ю. Опанасюк // *Енергетика: економіка, технології, екологія* – 2019, № 3, с. 65–73.

**М. Bezrodny**<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-0793-7317

**N. Prytula**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-3500-5165

**Kh. Matusevych**<sup>1</sup>, master student, ORCID 0009-0009-8853-6734

<sup>1</sup>**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

**INFLUENCE OF RECUPERATOR CHARACTERISTICS  
ON THE ENERGY EFFICIENCY OF HEAT PUMP–RECUPERATIVE  
VENTILATION AND AIR HEATING SYSTEMS**

*Based on the analysis of the results of previous studies, it is shown that an increase in the energy efficiency of combined heat pump–recuperator schemes for air heating and ventilation with air recirculation is mainly achieved due to the efficiency of the recuperator itself, namely by increasing its heat recovery efficiency coefficient.*

Therefore, when solving specific practical problems, the issue of a rational selection of the recuperator heat recovery coefficient arises  $\eta_p$ , which makes it possible to increase the energy efficiency of the ventilation or heating system while not exceeding acceptable mass and dimensional characteristics of the recuperator. In this regard, the present study analyzes the influence of the main characteristics of the recuperator (the heat recovery coefficient and the heat transfer coefficient) on the value of the specific surface area of the recuperator, which determines its mass and dimensional characteristics and allows a justified approach to defining the limits for increasing the energy efficiency of heat pump–recuperator ventilation and heating schemes under satisfactory values of the specific heat exchange surface area of the recuperator, and, consequently, its mass and dimensional characteristics. The analysis is performed for the case of plate heat exchangers, since the expediency of their use is determined by high thermal efficiency, compact design, and a large heat transfer surface area.

**Keywords:** energy efficiency, air heating, ventilation, air-source heat pump, recuperator, heat recovery coefficient, heat transfer coefficient.

#### References

1. Kadir Amasyali, Nora M. El-Gohary A review of data-driven building energy consumption prediction studies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81 (2018) 1192-1205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.095>
2. European Commission (2022), REPowerEU Plan [Електронний ресурс] // Режим доступу – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>
3. Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-Energy-Policies-in-a-Time-of-Transition-Heating-and-Cooling>
4. DBN B.2.5-67:2013. Heating, Ventilation and Air Conditioning. [Effective from January 1, 2014]. Official edition. Kyiv, 2013. 240 p.
5. On Approval of the Energy Strategy of Ukraine until 2050. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 373-r dated April 21, 2023. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Textoku>
6. On Approval of the Energy Strategy of Ukraine until 2035 “Security, Energy Efficiency, Competitiveness”. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 605-r dated August 18, 2017. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text>
7. Mysak, S., Shapoval, S., & Hyvliud, A. (2024). Analysis of the share of renewable energy sources in the gross final energy consumption of European countries. *Energy Technologies & Resource Saving*, 78(1), 59-75. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.05>
8. Basok, B., Dubovskiy, S., Pastushenko, E., Nikitin, Y., & Bazeev, Y. (2023). Heat pumps as a trend of low-carbon energy development. *Energy Technologies & Resource Saving*, 75(2), 23-44. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.02>
9. International Energy Agency [Електронний ресурс] // Режим доступу – <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
10. European Heat Pump Association (EHPA) [Електронний ресурс] // Режим доступу – <http://www.ehpa.org/>
11. M. Bezrodny, N. Prytula Energy Efficiency of Heat Pump Systems for Heating, Ventilation and Air Conditioning: Monograph. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Publishing House “Politekhnik”, 2023. 528 p.
12. Fabian Ochs, Martin Hauer, Michele Bianchi Janctti, Siegele Dietmar Energy Performance of Membrane Energy Recovery Ventilation in Combination with an Exhaust Air Heat Pump. Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA, Aug. 7-9, 2017, pp. 1121-1130. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.293>
13. Sonam Jangid. " Plate Type Heat Exchanger – A Review Study. | IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), vol. 08, no. 10, 2018, pp. 11-18.
14. Mancini, R. (2019). Design and Performance Analysis of Plate Heat Exchangers for Heat Pumps using Pure and Mixed Refrigerants (PhD thesis). Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark.
15. Bhuiyan, A. A., & Sadrul Islam A. K. M. (2016). Thermal and hydraulic performance of finned-tube heat exchangers under different flow ranges: A review on modeling and experiment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 38–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.022>
16. Qasem, N. A. A., & Zubair, S. M. (2018). Compact and microchannel heat exchangers: A comprehensive review of air-side friction factor and heat transfer correlations. *Energy Conversion and Management*, 173, 555–601. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.104>
17. M. Bezrodny Heat pump system for air heating and ventilation with recuperator and recirculation of exhaust air / M. Bezrodny, N. Prytula, I. Opanasyuk // *KPI Science News* – 2019, № 3, с. 7 – 15. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.3.175730>
18. M. Bezrodny Combined heat pump air heating and ventilation system with recirculation and heat recoverer / M. Bezrodny, N. Prytula, I. Opanasyuk // *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*. – 2019, № 3, с. 65–73.

Надійшла: 13.02.2026  
Received: 13.02.2026

Прийнята: 27.02.2026  
Accepted: 27.02.2026