

УДК 697.9:536.2:620.97:681.5(045)

аспірант Андрій Подлєсний,

andreypodlesniy21@gmail.com, ORCID: 0009-0009-2175-4307,

к.т.н., доц. Анатолій Петренко,

petrenko_ao@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0406-9852,

Український державний університет науки і технологій

ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.52-75>

УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ У ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ: ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПРОТИДІЯ ОБМЕРЗАННЮ

***Анотація.** Дана стаття присвячена систематизованому огляду сучасних технологій утилізації теплоти у вентиляційних системах з урахуванням їхньої енергоефективності та надійності роботи за низької температури зовнішнього повітря. Огляд охоплює узагальнену класифікацію та конструктивні особливості теплоутилізаторів, методи підвищення теплотехнічних характеристик і зниження аеродинамічного опору, а також моделювання тепло- та масообмінних процесів для прогнозування температурних полів, розподілу відносної вологості та втрат тиску. Методологічна основа дослідження базувалася на аналізі міжнародних і вітчизняних публікацій останніх років, що охоплюють як експериментальні роботи, так і чисельні моделі, а також оцінювання ефективності систем на основі показників життєвого циклу (LCA) та вартісного аналізу (LCC), що забезпечує врахування енергетичних, екологічних і економічних аспектів експлуатації. Особливу увагу приділено проблемі обмерзання теплообмінних поверхонь у холодному кліматі, особливо пластинчастих рекуператорів, які є найбільш уразливими до фазових переходів вологи з подальшим утворенням інею. Проаналізовано фізичні механізми цього процесу та його наслідки для роботи систем, зокрема зі зростанням аеродинамічного опору та втратою ефективності. Також проведено аналіз наявних автоматизованих інженерних методів протидії обмерзанню, що охоплюють пасивні та активні інженерні рішення (байпасні канали, попередній підігрів, спеціалізовані покриття), а також високотехнологічні підходи на основі термоелектричних модулів (ТЕМ), багатоканальної сенсорики та предикативного керування (MPC). Отримані результати дослідження підтверджують, що ефективність систем утилізації теплоти визначається поєднанням конструктивних удосконалень, інноваційних матеріалів і цифрових технологій управління. Запропоновані в роботі підходи можуть бути корисними для проєктувальників, виробників кліматичного*

обладнання та дослідників, зацікавлених у створенні енергоефективних і надійних систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря. Визначено перспективні напрями подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення пластинчастих теплообмінників і створення інтелектуальних систем керування кліматичним обладнанням, адаптованих до умов холодного клімату.

Ключові слова: вентиляційні системи; теплоутилізація; рекуперація; пластинчасті теплообмінники; енергоефективність; холодний клімат; обмерзання; керування.

Вступ. В умовах глобальної енергетичної нестабільності, зростання вартості ресурсів і посилення екологічних загроз, підвищення енергоефективності будівель постає як одне з ключових завдань сталого розвитку та сучасної кліматичної політики. За даними Міжнародного енергетичного агентства (International Energy Agency, IEA), будівлі споживають близько 30 % світової кінцевої енергії. При цьому системи опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (Heating, Ventilation, and Air Conditioning – HVAC) становлять значну частку цього обсягу. У розвинених країнах їх частка може сягати 40-50 % [1]. Водночас, за оцінками Європейської Комісії, у житловому секторі ЄС приблизно 80 % енергії витрачається на опалення, охолодження та гаряче водопостачання [2]. Такі показники свідчать про вирішальну роль систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря в загальній енергетичній ефективності будівельного сектору як у глобальному, так і в європейському контексті.

Згідно з впровадженням Європейського зеленого курсу (European Green Deal) та відповідно до положень Директиви 2010/31/ЄС щодо енергоефективності будівель (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD), інтеграція вискоелективних вентиляційних систем із теплоутилізацією є визначальною для зменшення енергоспоживання та зменшення викидів CO₂ [3]. Використання таких вентиляційних систем, особливо в умовах холодного клімату, дозволяє суттєво знизити навантаження на системи опалення приміщень. Водночас за низьких зовнішніх температур ефективність теплообмінників зменшується через процеси обмерзання, що може призводити до зниження енергоефективності та порушення стабільної роботи вентиляційних систем з утилізацією теплоти. Для запобігання цьому явищу застосовуються певні технічні рішення, зокрема рециркуляція повітря, байпасування теплообмінника, попереднє підігрівання зовнішнього повітря, а також автоматизовані системи розморожування [4]. Однак, попри ефективність у боротьбі з обмерзанням, такі стратегії можуть знижувати загальну енергоефективність системи, що потребує ретельного балансування між

тепловим ефектом від теплоутилізації та додатковими витратами на впровадження захисних заходів [5].

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження утилізації теплоти у вентиляційних системах зумовлена зростанням вимог до енергоефективності будівель та необхідністю мінімізування тепловтрат у холодному кліматі. Одним із найпоширеніших інженерних рішень для досягнення цієї мети є застосування пластинчастих рекуператорів, які дозволяють повертати частину теплоти з витяжного повітря до припливного потоку. Водночас за низьких температур ці пристрої схильні до обмерзання теплообмінних поверхонь, що призводить до зниження ефективності теплообміну, збільшення аеродинамічного опору та ймовірності виходу обладнання з ладу. Сучасні стратегії боротьби з обмерзанням не завжди забезпечують стабільну роботу систем і можуть спричиняти додаткові енергетичні витрати. Це зумовлює необхідність всебічного аналізу наявних підходів, узагальнення сучасного досвіду та пошуку оптимальних інженерних рішень, які забезпечують ефективну роботу систем в умовах низької температури зовнішнього повітря.

Останні дослідження та публікації. У закордонній та вітчизняній науковій літературі останніх років активно досліджуються аспекти підвищення енергоефективності вентиляційних систем із утилізацією теплоти. Найбільш розповсюдженими технологіями є пластинчасті й роторні теплоутилізатори та їхні модифікації з утилізацією вологи (ентальпійні), які відрізняються за принципом дії, ефективністю та чутливістю до кліматичних умов використання [4,6,7]. Серед них особливе місце займають пластинчасті теплообмінники завдяки поєднанню конструктивної простоти, високої ефективності теплопередачі та широким можливостям для подальшої інженерної оптимізації.

У цьому контексті низка публікацій [8–10] зосереджена на вдосконаленні їхньої геометрії, зокрема каналів, з метою покращення інтенсивності теплообміну без збільшення габаритів пристрою. Значну роль у цьому процесі відіграють технології обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics – CFD), які за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, дають змогу змоделювати розподіл температур, аеродинамічний опір і теплову ефективність при різних конструктивних параметрах. Отримані за допомогою CFD дані, як правило, проходять валідацію шляхом порівняння з експериментальними результатами, що забезпечує високу достовірність висновків і сприяє створенню більш ефективних вентиляційних систем із утилізацією теплоти.

На наступному етапі чисельного аналізу моделювання розподілу температури та відносної вологості всередині теплоутилізаторів демонструє залежність ефективності від матеріалів пластин, геометрії каналів і швидкісних

характеристик повітряного потоку, що наочно підтверджено у низці сучасних прикладних досліджень [11,12].

Паралельно з дослідженнями, спрямованими на оптимізацію конструкції теплоутилізаторів і моделювання внутрішніх процесів тепло- та масообміну, окремий напрям наукових робіт присвячено оцінюванню енергетичних втрат і загальної ефективності вентиляційних систем із утилізацією теплоти в змінних кліматичних умовах. У сучасній науковій літературі представлено низку публікацій [13–16], де для комплексної оцінки довгострокової ефективності таких систем застосовують методи оцінювання життєвого циклу (Life Cycle Assessment – LCA) та вартісного аналізу життєвого циклу (Life Cycle Costing – LCC), які доповнюють один одного шляхом оцінювання відповідно екологічних та економічних аспектів. Додатково використовуються багатозонне моделювання, динамічна симуляція та експериментальні дослідження, що дозволяє врахувати сезонні коливання температур, зміну режимів експлуатації та реальні теплові втрати протягом усього строку служби кліматичного обладнання.

Утім, саме експлуатація вентиляційних систем із утилізацією теплоти в умовах низьких температур виявляє низку додаткових ускладнень, серед яких домінує проблема обмерзання теплообмінників. Це явище є особливо критичним для пластинчастих рекуператорів, де волога з витяжного повітря конденсується та замерзає на охолоджених поверхнях і блокує повітряний потік. Проблема обмерзання теплообмінників у холодному кліматі залишається одним із ключових бар'єрів для стабільної та енергоефективної роботи вентиляційних систем із утилізацією теплоти. За даними оглядових і прикладних досліджень [4,5,12,17–21], формування інею з подальшим утворенням льоду на теплообмінних поверхнях призводить до зниження ефективності, збільшення аеродинамічного опору, порушення повітряного балансу і, в критичних випадках, до повної зупинки роботи системи, що зумовлює необхідність впровадження таких інженерних рішень, як попередній підігрів припливного повітря, байпасування теплообмінника, а також інші методи активного та пасивного захисту. Серед останніх окрему увагу в сучасних дослідженнях приділено використанню гідрофобних та антиобмерзальних покриттів. Вони здатні знижувати адгезію вологи до теплообмінних поверхонь і стримувати ініціацію кристалізації льоду, що демонструє ефективність та підтверджується результатами експериментальних досліджень [22–24].

Поряд із традиційними підходами, на кшталт попереднього підігрівання припливного повітря чи байпасування теплообмінника, сучасні дослідження дедалі частіше фокусуються на високотехнологічних засобах активного захисту від обмерзання. Зокрема, перспективними напрямками є використання

термоелектричних модулів (Thermoelectric Modules – TEM) [25–28], а також упровадження інтелектуальних алгоритмів автоматизованого керування процесом розморожування на основі предикативного регулювання (Model Predictive Control – MPC) [29–32]. Такий підхід дозволяє на підставі математичного прогнозування змін зовнішніх кліматичних параметрів у реальному часі формувати оптимальні керівні дії з урахуванням обмежень системи. Це мінімізує ризик обмерзання та підвищує загальну ефективність вентиляції.

Хоча в українській науковій літературі кількість публікацій, присвячених вентиляційним системам з утилізацією теплоти, поступається обсягам досліджень у провідних закордонних фахових виданнях, вітчизняні дослідники також активно долучаються до розроблення ефективних технологічних рішень. Частина публікацій присвячена вдосконаленню (оптимізації) конструкцій теплоутилізаторів, зокрема використанню двофазних теплообмінних елементів [33], еластичних або полімерних матеріалів для поверхонь теплообміну [34,35], а також мембранних структур, орієнтованих на інтенсифікацію процесів тепло- та масообміну в системах «повітря–повітря» [36]. Інші роботи зосереджуються на дослідженні ефективності вентиляційних теплоутилізаторів у реальних умовах експлуатації житлових приміщень з охопленням різних конфігурацій побутових вентиляційних систем [37,38]. У загальному контексті розвитку енергоефективних технологій вітчизняна література також робить акцент на теплоутилізаторах як ключовому елементі системи механічної вентиляції, здатному суттєво знижувати тепловтрати в будівлях [39]. Поряд із конструктивними та експлуатаційними аспектами, важливим напрямом досліджень є питання інтелектуального керування та енергетичної оптимізації, зокрема з використанням ексергетичних підходів до автоматизованого управління вентиляційними системами [40]. Таким чином, навіть з огляду на певну обмеженість технічних ресурсів, ці та інші вітчизняні дослідження засвідчують наявність наукового потенціалу у сфері розвитку вентиляційних систем з утилізацією теплоти й підтверджують актуальність проблематики підвищення загальної енергоефективності будівель в Україні.

Ефективність теплоутилізаторів визначається температурним коефіцієнтом ефективності (ТКЕ), який часто, але некоректно, в науково-популярній літературі називають коефіцієнтом корисної дії (ККД)

$$\eta = \frac{\Phi_{rec}}{\Phi_{exh}} \text{ або } \eta = 100 \cdot \frac{\Phi_{rec}}{\Phi_{exh}}, \%$$
(1)

де Φ_{rec} – утилізована явна або повна теплота, Вт, Φ_{exh} – теплова потужність (повна або явна теплота) витяжного повітря, що може бути передана потоку припливного повітря при його нагріванні чи охолодженні до початкової температури, Вт.

Таким чином, проведений аналіз літератури свідчить про багатогранність досліджень у сфері вентиляції з утилізацією теплоти, особливо в аспектах зменшення тепловтрат, підвищення енергоефективності та усунення негативних наслідків обмерзання теплообмінників. Наявність різноманітних науково-технічних підходів і технологічних рішень свідчить про глибину проблематики та актуальну потребу в систематизації сучасного досвіду і практично орієнтованих стратегій. Ці аспекти підтверджують як багатовекторність наукових досліджень у сфері вентиляції з утилізацією теплоти, так і потребу в комплексному осмисленні їхньої ефективності, обмежень та потенціалу практичного застосування в умовах низькотемпературної експлуатації.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є систематизація сучасних технологій теплоутилізації у вентиляційних системах з урахуванням енергетичної ефективності та експлуатаційної надійності в умовах низької температури зовнішнього повітря. Особливу увагу приділено аналізу процесів обмерзання теплообмінників, наявних методів протидії цьому явищу (традиційних і високотехнологічних), а також перспективам застосування інтелектуальних систем керування на основі предикативних моделей.

У результаті огляду наукових досліджень передбачається виокремлення ефективних технічних рішень, визначення їхніх переваг і обмежень, а також окреслення напрямів подальших досліджень у сфері підвищення працездатності та енергоефективності вентиляційних систем з утилізацією теплоти в холодному кліматі.

Основна частина. Для забезпечення цілісного розуміння сучасного стану та викликів, пов'язаних із впровадженням вентиляційних систем з теплоутилізацією в умовах низької температури зовнішнього повітря, нижче здійснено систематизований огляд ключових напрямів досліджень і технологічних рішень. Особливу увагу приділено типології теплообмінників, чинникам енергоефективності та фізичним механізмам обмерзання. Окремо розглянуто можливості автоматизованого та інтелектуального керування вентиляційними системами, з акцентом на запобігання та мінімізування процесів обмерзання утилізаторів теплоти. Подальший аналіз розпочинається з огляду конструктивних особливостей і принципів роботи систем теплоутилізації, адже саме вони формують підґрунтя даного дослідження.

Сучасні вентиляційні системи з теплоутилізаторами реалізують широкий спектр технічних рішень на основі застосування різних типів теплообмінників:

пластинчастих, роторних, теплових трубок, систем змійовиків із замкнутим контуром, інноваційних конструкцій, зокрема VENTIREG і VentireC (рис. 1), а також гібридних конфігурацій (рис. 2) [4]. Окрему увагу привертають пристрої, що функціонують на основі двофазного теплопереносу – зокрема термосифони, теплові труби та пульсаційні теплові труби (рис. 3).

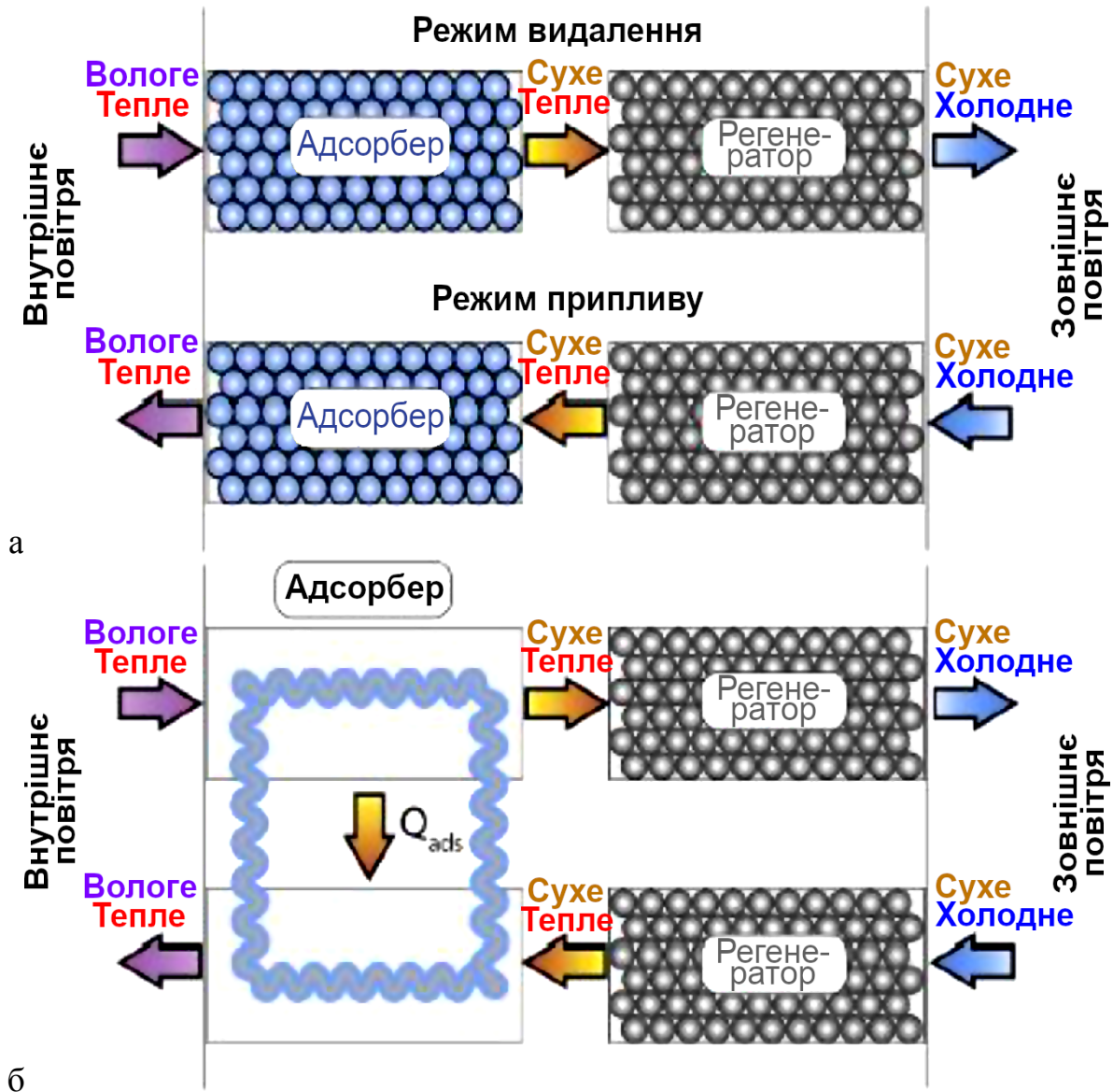


Рис. 1. Інноваційні конструктивні схеми теплообмінників [4]:
а - схема VENTIREG, б - схема VentireC

У роботі українських дослідників [33] проаналізовано потенціал таких рішень, що працюють за замкненим випарно-конденсаційним циклом та при компактних розмірах забезпечують ТКЕ до 85 %. Завдяки низькому аеродинамічному опору вони можуть бути конструктивно модифіковані для часткового регулювання відносної вологості повітря в приміщенні.

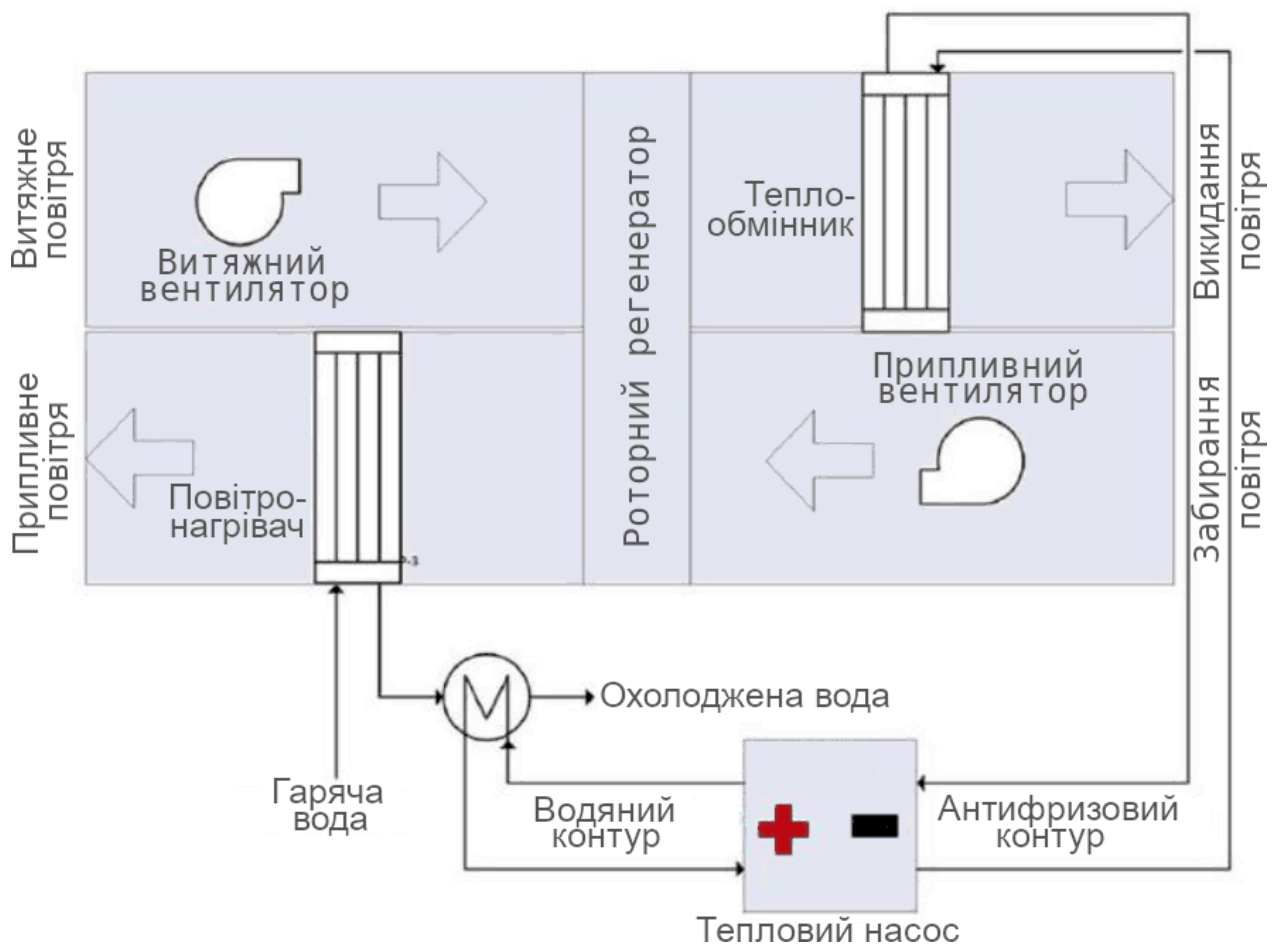


Рис. 2. Схема припливно-витяжної установки (АНУ) з комбінованим тепловим насосом і утилізацією теплоти витяжного повітря [4]

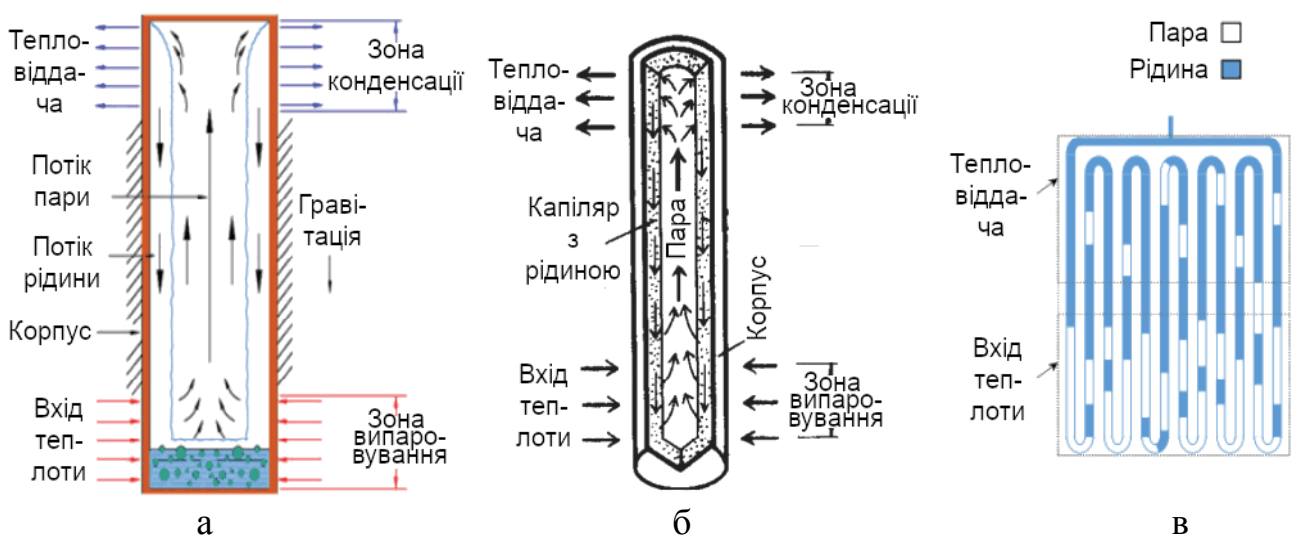


Рис. 3. Типи теплових труб, які застосовуються в теплообмінниках-утилізаторах [33]:

а - термосифон, б - теплова труба, в - пульсаційна теплова труба

У цьому ж контексті, інша вітчизняна розробка [34] пропонує використання еластичних поверхонь теплопередачі, здатних змінювати геометрію під дією потоку або температури, забезпечуючи при цьому ефективність роботи та зменшуючи ризики обмерзання обладнання.

Найбільш поширеними в проєктуванні є пластинчасті та роторні теплообмінники, зокрема їх ентальпійні модифікації, здатні передавати як явну теплоту, так і вологу (приховану теплоту). Кожен тип має свої специфічні конструктивно-технологічні особливості, що визначають їх експлуатаційні переваги та обмеження, особливо за умов низьких температур [6,7].

Пластинчастий рекуператор реалізує теплообмін між припливним і витяжним повітрям через тонкі пластини з алюмінію, полімерів або обробленої целюлози. За схемою руху повітря розрізняють протитечійні, перехреснотечійні (рис. 4) та змішані конфігурації. За даними [6], їхній температурний коефіцієнт ефективності може досягати 85–90 % за умови оптимального вибору геометричної форми й розмірів, матеріалів і режимів повітрообміну.

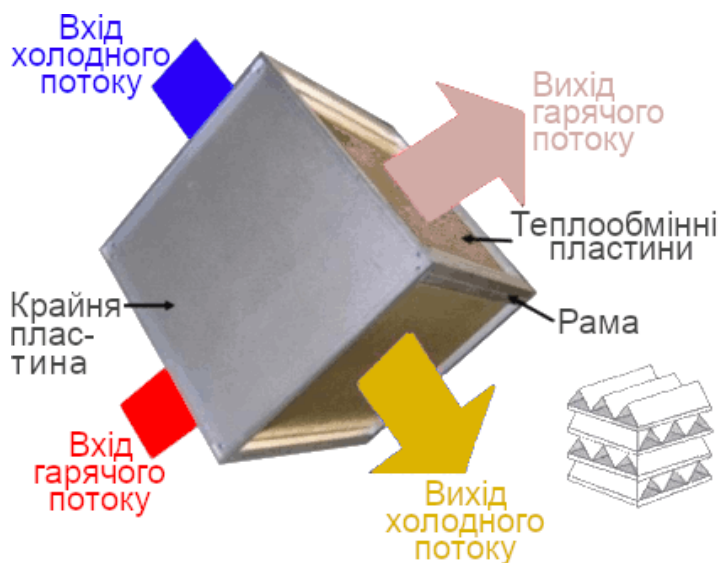


Рис. 4. Схема пластинчастого теплообмінника (рекуператора) з перехресним потоком [4]

Відомо, що підвищенню ефективності сприяє певна структурна оптимізація повітряних каналів, зокрема використання хвилястих поверхонь, заглиблень та/або мікротурбулізаторів (рис. 5). У роботі [8] наведено чисельне моделювання, яке показало зростання тепловіддачі на 12 % без суттєвого збільшення аеродинамічного опору при використанні хвилястої структури.

Питання добору матеріалів пластин також залишається актуальним. У публікації [35] розглянуто використання поліетиленових поверхонь теплопередачі, які демонструють високу корозійну стійкість і потенціал для зниження вартості обладнання за збереження порівняної ефективності.

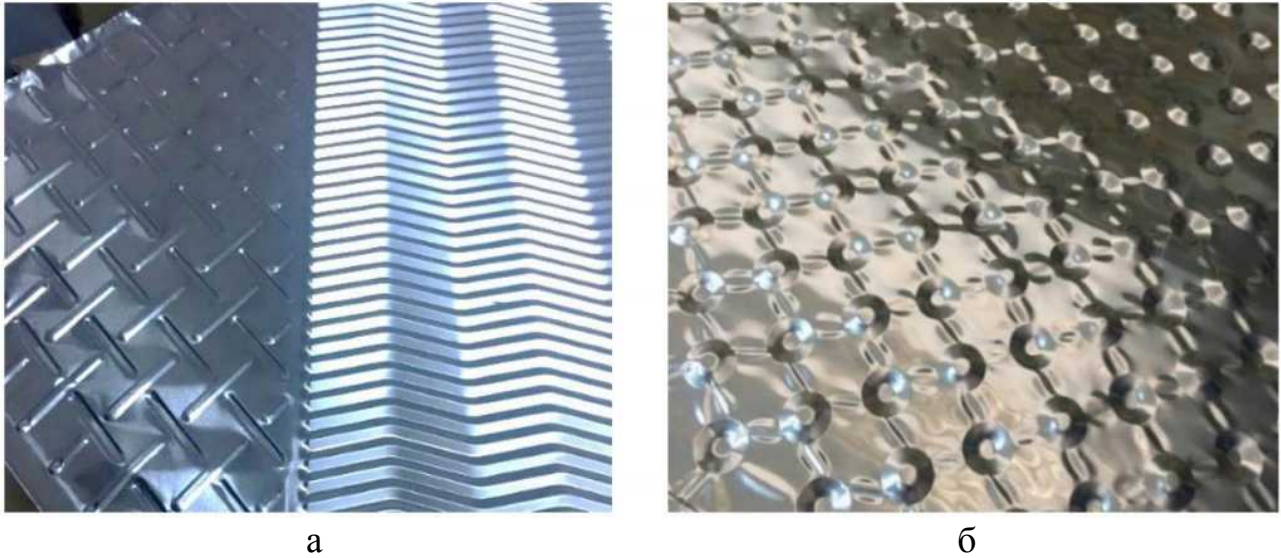


Рис. 5. Конструктивні елементи повітряних каналів [8]:
а – виступи та хвилі; б - заглиблення

Ентальпійні модифікації пластинчастих теплообмінників, згідно з [6], реалізуються шляхом застосування спеціальних напівпроникних мембран з обробленої целюлози та гідрофільних полімерів, які дозволяють часткову передачу прихованого (латентного) тепла та вологи. Це дає змогу не лише ефективно утилізувати теплоту, але й зберігати вологість повітря в приміщенні в зимовий період.

Роторний регенератор – це обертовий ротор (барабан) із щільно намотаною металевою стрічкою чи керамічною пористою структурою, яка формує канали для проходження повітря.

Під час обертання він по чергову контактує з витяжним і припливним повітрям (рис. 6), що призводить до передавання накопиченої теплоти, а за наявності сорбційних матеріалів – і частину вологи, що розширює його функціональні можливості.

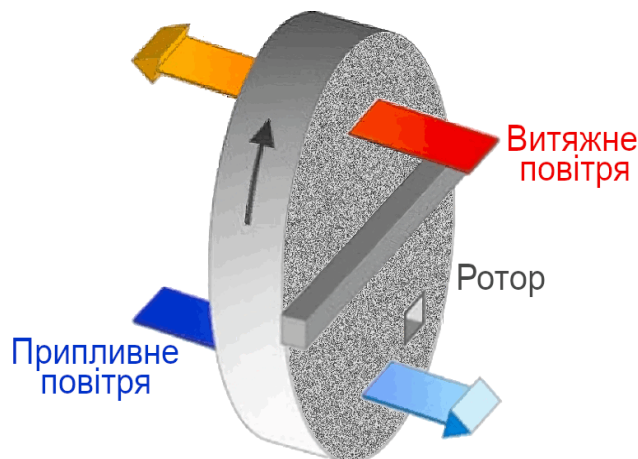


Рис. 6. Схема роторного регенератора [4]

Цей спосіб теплообміну є регенеративним. Але в літературі, особливо науково-популярній та комерційній, можна зустріти термін «ротаторний рекуператор», що є некоректним. Адже рекуперативним прийнято називати спосіб теплопередачі крізь стінку.

Як показано у дослідженні [7], роторні теплообмінники завдяки обертовому елементу з високою теплоємністю ефективно передають явну теплоту, а в ентальпійних модифікаціях – частково й вологу (приховану теплоту). Це підвищує комфорт у приміщеннях, зменшує потребу в додатковому зволоженні взимку та знижує ризики обмерзання, що робить їх особливо придатними для холодного клімату. Вони дозволяють досягти високої ефективності при значно менших габаритах, аніж рекуперативні теплоутилізатори. Регулювання швидкості обертання дозволяє керувати процесом теплообміну, чого неможливо досягти в рекуперативних пристроях без значних ускладнень (байпасів). Водночас такі системи потребують регулярного обслуговування, зокрема чищення та змащування підшипників.

Вибір застосування типу теплоутилізатора у вентиляційних системах значною мірою залежить від вимог до ефективності повторного використання теплоти, підтримання відносної вологості повітря, конструктивних обмежень, рівня технічного обслуговування й енергоефективності в цілому. Для узагальненого порівняння експлуатаційних і функціональних характеристик пластинчастих і роторних теплоутилізаторів доцільно проаналізувати їх ключові відмінності, зокрема щодо передавання вологи, ризику обмерзання, енергоспоживання, комфорту в приміщенні, характеру повітрообміну та інших техніко-експлуатаційних параметрів (таблиця 1).

Такий порівняльний аналіз дозволяє чітко ідентифікувати ключові переваги та обмеження кожного типу теплообмінника, що є критично важливим для прийняття обґрунтованих проєктних рішень з урахуванням вимог мікроклімату, енергоспоживання та умов експлуатації.

Подальший розвиток теплообмінників пов'язаний із комплексною оптимізацією геометрії та аеродинаміки, що реалізується за допомогою CFD-моделювання. Такий підхід дозволяє відтворювати процеси тепло- й масообміну в умовах, наближених до реальних. Зокрема, вдосконалення геометрії каналів пластинчастих рекуператорів шляхом використання профільованих поверхонь і мікротурбулізаторів забезпечує підвищення ефективності теплообміну без збільшення габаритів пристрою [8, 9]. Експериментально підтверджено [9], що така оптимізація зменшує локальні втрати тиску та підвищує однорідність розподілу температурного поля (рис. 7).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика пластинчастих і роторних теплоутилізаторів

Тип	Пластинчастий	Роторний
Розділення потоків	Повністю розділені	Часткове перемішування
Передавання вологи	Лише в ентальпійних моделях	Часткова / більша в ентальпійних моделях
Схильність до обмерзання	Висока	Низька (завдяки вологообміну)
Обслуговування	Мінімальне (перевірка каналів, фільтрів)	Регулярне (очищення та змащення підшипників)
Енергоспоживання	Низьке	Помірне (двигун)
Комфорт у приміщенні	Можливе пересушування взимку, більша вологість в ентальпійних моделях	Більша вологість у зимовий період, але можливе часткове змішування повітря
ТКЕ	70-90 %	75-85 %

У дослідженні [10], присвяченому CFD-моделюванню пластинчастого теплообмінника з рідинним теплоносієм у середовищі ANSYS Fluent, проаналізовано вплив змін геометрії каналів (кут, глибина, крок гофрів) на втрати тиску, розподіл температури та турбулентність потоку. Це вказує на потенціал адаптації такого підходу до вентиляційних теплоутилізаторів за умови врахування специфіки їх експлуатації.

Водночас у роботі [11] зафіксовано високу відповідність між розрахунковими та експериментальними даними ефективності теплообміну, що свідчить про надійність методів термогідродинамічного аналізу для оцінки реальних характеристик. Таким чином, CFD-моделювання розширює інженерні можливості розроблення обладнання та проєктування, що дозволяє завчасно адаптувати конструкцію до конкретних кліматичних та експлуатаційних умов.

Разом із технічним удосконаленням конструкцій теплоутилізаторів постає необхідність комплексного оцінювання їх функціонування, яке не обмежується суто теплотехнічними параметрами. Реальна енергоефективність вентиляційних систем з теплоутилізацією визначається не лише геометрією та матеріалами теплообмінників, але й умовами експлуатації, тривалістю служби, витратами на обслуговування та рівнем інтеграції в інженерну інфраструктуру будівлі. Тому доцільним є розгляд повного життєвого циклу – від проєктування та монтажу до експлуатації та утилізації, що дозволяє зіставити витрати й енергоспоживання з очікуваним ефектом від технологічних рішень, особливо в умовах холодного клімату [13,14].

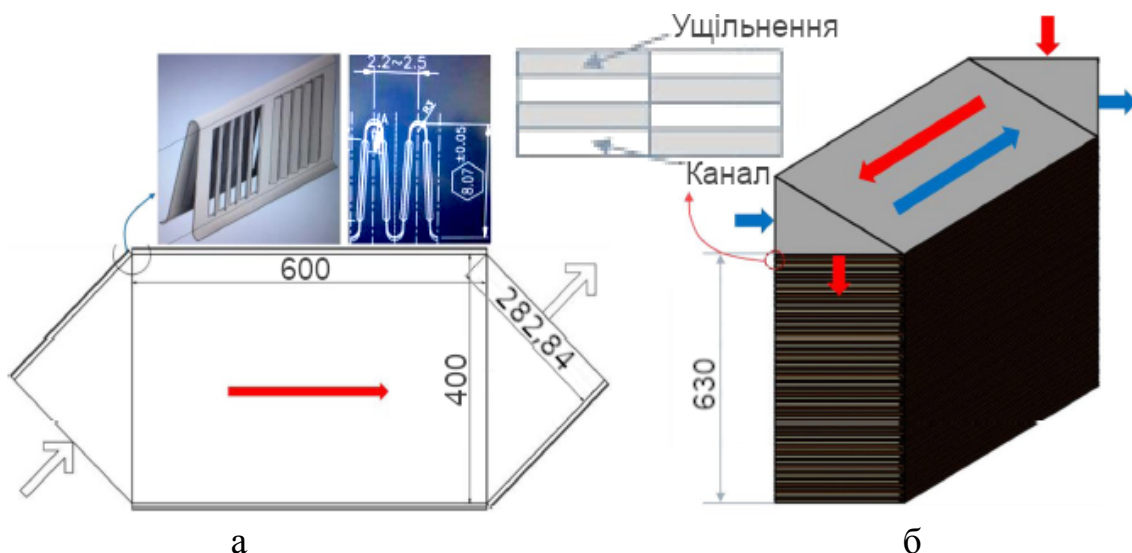


Рис. 7. Фінальна конструкція (прототип) компактного пластинчастого теплообмінника [9]:

а – внутрішня частина теплообмінника з розшаруванням потоків,
б - зовнішня частина теплообмінника

У структурі життєвого циклу вентиляційних систем найбільш енергозатратним етапом є експлуатація, де ефективність і стабільність обладнання визначають довгострокові результати. Тип теплообмінника суттєво впливає на ці показники: пластинчасті рекуператори вирізняються нижчими витратами на обслуговування, роторні – стійкістю до обмерзання, а полімерні конструкції – довговічністю [5,35]. Разом з тим, у реальних умовах ТКЕ може знижуватися через відхилення від проєктних режимів, впливу факторів навколишнього середовища та недостатній технічний догляд: у холодному кліматі ефективність падає на 30-40 % вже за кілька днів роботи без належного антиобмерзального захисту [5], що підтверджує важливість контролю параметрів і своєчасного обслуговування [37].

Для збереження стабільної енергоефективності доцільно застосовувати методології оцінювання на основі повного життєвого циклу інженерних систем. Поєднання LCA та LCC дозволяє врахувати як скорочення викидів CO₂ завдяки гібридним системам вентиляції [13–15], так і довгострокову доцільність інвестицій у мембранні чи полімерні теплообмінники або рішення з інтегрованим контролем і керуванням [16,35]. Практичні результати досліджень підтверджують ефективність такого підходу навіть у складних кліматичних умовах, де застосування регенеративних систем знизило річне енергоспоживання будівель більш ніж на 40 % порівняно з типовими рішеннями [20], тоді як українські дослідження зафіксували досягнення ТКЕ до 82 % у житловому секторі [37].

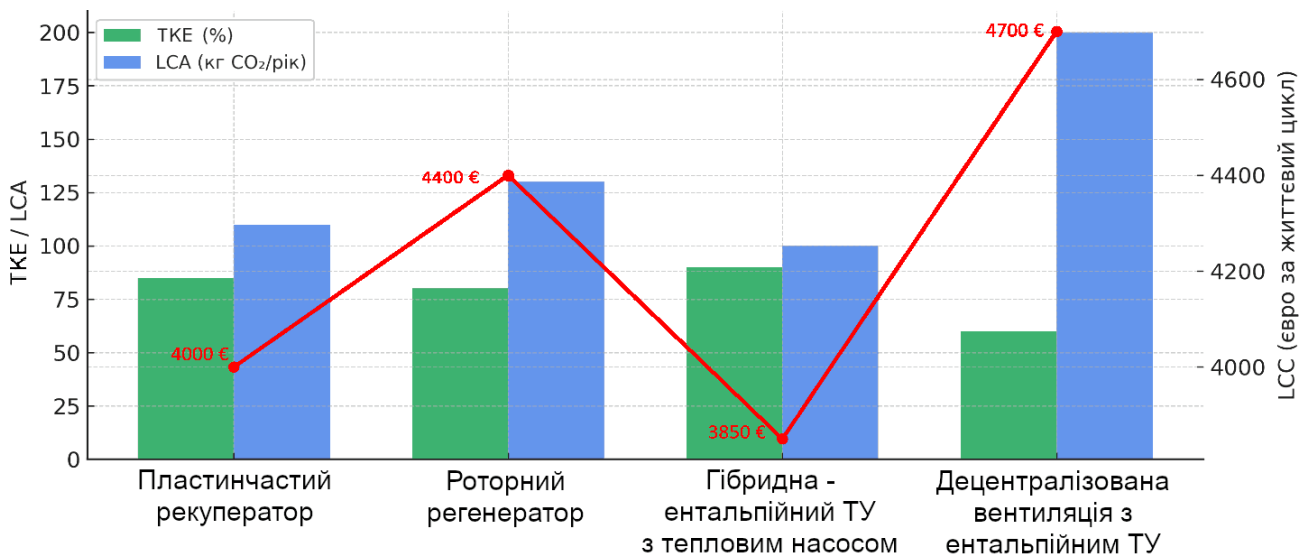
Додатково, інтеграція вентиляції з іншими інженерними підсистемами

сприяє оптимізації енергоспоживання протягом усього життєвого циклу [26]. Крім того, як показано в [38], використання децентралізованої вентиляції з теплоутилізаторами теж дає змогу скоротити загальні енерговитрати, хоча такі інженерні рішення є ефективними лише у вузьких сценаріях застосування. У свою чергу, огляд [39] систематизує переваги й обмеження різних типів рішень теплоутилізації залежно від конструктивних характеристик і кліматичних умов, що формує основу для стратегічного вибору технічних рішень у проектуванні.

З метою узагальнення результатів наведених практичних досліджень та систематизації впливу різних інженерних рішень на TKE, LCA і LCC доцільно проаналізувати їх у вигляді зведеного графіка (рис. 8)

Порівняльні дані діаграми демонструють різницю між централізованими та децентралізованими системами за показниками TKE, LCA та LCC, що особливо важливо в умовах холодного клімату, де стабільність роботи визначає не лише рівень енергоефективності, але й стійкість до обмерзання – одного з ключових викликів експлуатації.

Як показав попередній аналіз, надійність роботи рекуператорів в умовах низьких температур визначається не лише конструктивними рішеннями, а й здатністю системи протистояти процесам утворення інею, які поступово знижують ефективність та можуть спричинити аварійні відмови. Фізична природа цього явища пов'язана з фазовими переходами водяної пари у витяжному повітрі: при досягненні точки роси відбувається конденсація, а подальше охолодження нижче 0°C призводить до формування інею на поверхнях рекуператора [17].



Тип теплоутилізації в системі вентиляції
Рис. 8. Зведена оцінка вентиляційних систем за показниками TKE, LCA та LCC

Цей процес найбільш інтенсивний у зоні виходу витяжного повітря [19] та за низької швидкості повітряного потоку [12], що забезпечують триваліший контакт із охолодженою поверхнею. Він є особливо критичним для пластинчастих теплообмінників, у яких відсутній механізм регенеративного нагрівання, а передавання теплоти відбувається безпосередньо крізь тверді перегородки.

На початкових стадіях формується тонкий шар кристалів, який швидко переходить у щільні нашарування, значно знижуючи при цьому тепловіддачу та ефективність теплообміну [18,21]. Для мембранних конструкцій додатковим чинником є обмежена теплопровідність селективних перегородок, що ускладнює балансування градієнтів вологовмісту й температури в холодному середовищі [36].

Практичні дослідження підтверджують, що вже протягом перших годин роботи вентиляційної системи при від'ємних температурах ТКЕ може знижуватися на 20-30 %, а в разі подальшого накопичення льоду – до 40 % [12]. Особливо показовими є вимірювання у [5], де при температурі мінус 5 °С фіксується різке падіння швидкості повітряного потоку та порушення балансу системи, що працювала тривалий час без захисту від намерзання рекуператора (рис. 9).

Таким чином, наростання шару інею супроводжується підвищенням аеродинамічного опору, що безпосередньо впливає на зменшення об'ємної витрати повітря. У свою чергу, таке зростання змушує вентилятори працювати в режимі перевантаження, значно підвищуючи при цьому споживання енергії та скорочуючи загальний робочий ресурс [21].

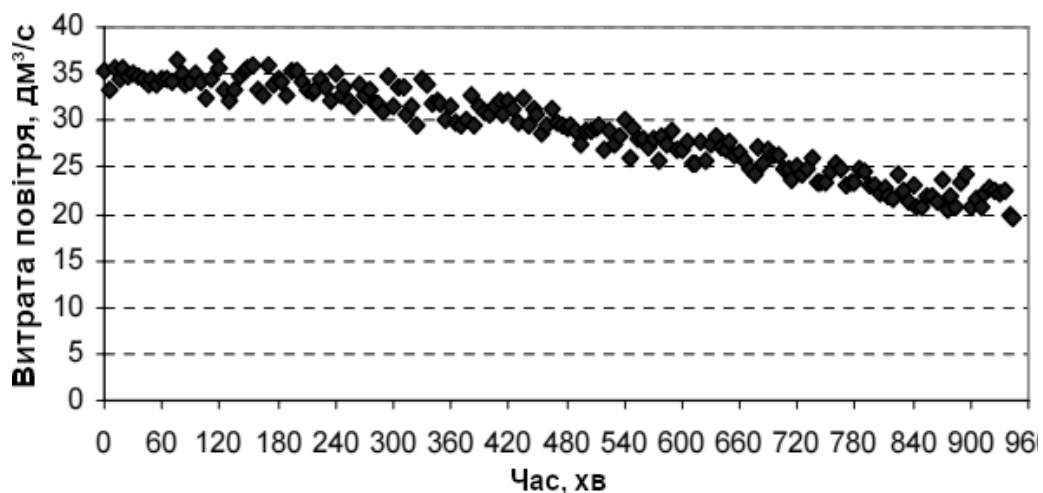


Рис. 9. Вимірювання швидкості потоку витяжного повітря в типовому блоці пластинчастого рекуператора при низькій температурі на вході (-5 °С) [5]

У системах з недостатньою автоматизацією це може призвести до аварійної зупинки обладнання. Це може бути критичним для приміщень з високими вимогами до безперервного повітрообміну – медичних установ, шкільних та дошкільних закладів освіти.

Отже, обмерзання постає не лише як локальна проблема пластинчастих теплообмінників, але й як системний виклик, що визначає надійність усієї вентиляційної мережі. Це створює підґрунтя для впровадження інженерних та автоматизованих методів протидії утворенню інею, спрямованих на підвищення надійності систем у екстремальних кліматичних умовах.

Серед базових методів протидії обмерзанню виокремлюють байпасні тракти, попередній підігрів припливного повітря та використання антиобмерзальних покриттів. Як показано в [21], байпас дозволяє тимчасово вивести теплообмінник із основного потоку при критичному обмерзанні, тоді як підігрів знижує ризик досягнення точки роси, компенсуючи додаткові витрати стабільністю роботи системи [4,18]. Використання супергідрофобних покриттів, відповідно до [22,23], зменшує адгезію вологи до металевих поверхонь. Дослідження [24] демонструє можливість зниження накопичення льоду за рахунок цього методу на 40-50 % залежно від режиму роботи інженерних систем.

Поряд із традиційними рішеннями, перспективним напрямом також вважається застосування термоелектричних модулів (ТЕМ), які дозволяють точково регулювати тепловий режим у зонах ризику обмерзання. У роботі [25] показано, що інтеграція ТЕМ у пластинчасту структуру забезпечує адаптивний контроль теплообміну відповідно до поточних параметрів повітряного потоку. Дослідження [26–28] підтверджують можливість стабільної роботи таких систем при температурах до мінус 10 °С, хоча ключовим обмеженням залишається енергоспоживання й складність керування. Для підвищення ефективності критичною є точність сенсорного моніторингу, зокрема багатоточковий збір даних температури, вологості та тиску [4,18]. При цьому розподілені сенсорні мережі й компенсаційні алгоритми дозволяють уникати спотворення даних у зонах локального охолодження, що особливо важливо при реалізації ексергетично-орієнтованих стратегій керування [40].

Подальший етап розвитку систем керування базується на впровадженні інтелектуальних методів, де особливого поширення набуває активне використання прогнозного (предикативного) регулювання (МРС). На відміну від класичних PID-регуляторів (Proportional-Integral-Derivative – PID), МРС дозволяє враховувати динамічні характеристики теплообмінника, прогнозовані зміни навколишнього середовища та теплову інерцію системи. У роботах [29,30] запропоновано інтелектуальні стратегії МРС-керування теплообміном,

орієнтовані на прогнозування змін зовнішніх умов та стабілізацію роботи інженерних систем. Хоча реалізація виконана для теплообмінника з рідинним теплоносієм у MATLAB/Simulink, розроблені алгоритми є універсальними й можуть бути адаптовані до вентиляційних теплоутилізаторів із інтегрованими ТЕМ-модулями для підтримання теплового балансу та запобігання процесам обмерзання. Дослідження [31,32] підтверджують, що за коливань зовнішньої температури такі рішення підтримують стабільний повітрообмін і оптимальні параметри мікроклімату. Знижуються частота відкриття байпасів та теплові навантаження на обладнання, що продовжує експлуатаційний ресурс (рис. 10).

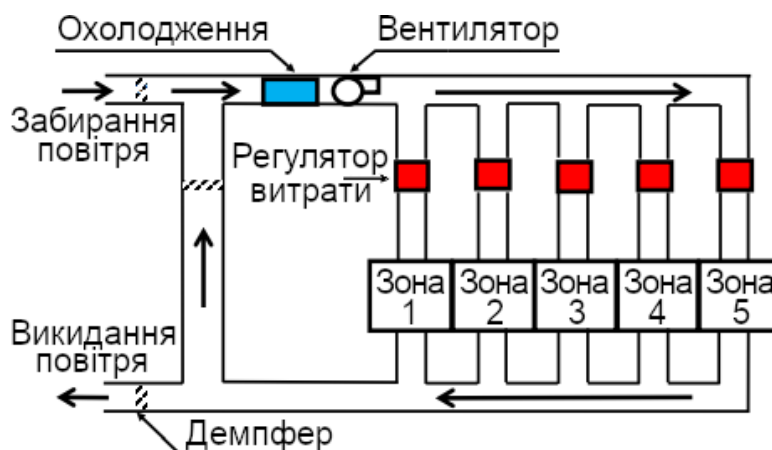


Рис. 10. Загальна схема досліджуваної HVAC-системи з реалізованим MPC-керуванням [31]

Таким чином, поєднання конструктивних удосконалень із сенсорними технологіями, термоелектричними модулями та предикативним керуванням створює основу для формування інтелектуальних теплоутилізаторів нового покоління. Такі системи здатні в режимі реального часу підтримувати стабільність параметрів мікроклімату та забезпечувати баланс між енергоефективністю, безпекою й надійністю.

Висновки. Ефективність вентиляційних систем із теплоутилізацією визначається не лише конструктивними параметрами теплообмінників, а й здатністю забезпечувати стабільний тепло- та масообмін у різноманітних кліматичних сценаріях. Огляд сучасних технологічних рішень показав, що енергоефективність систем ґрунтується на раціональному виборі типу теплоутилізатора, урахуванні аеродинамічних і теплотехнічних характеристик з використанням CFD-моделювання для прогнозування температурних полів, розподілу відносної вологості та втрат тиску. Оцінка сезонного впливу із застосуванням показників життєвого циклу (LCA) та вартісного аналізу (LCC) підтвердила доцільність інтеграція енергетичних, екологічних і економічних чинників у єдину систему прийняття рішень.

Дослідження фізичних процесів обмерзання рекуператорів засвідчило, що поєднання низьких температур, підвищеної вологості та конструктивних особливостей пластинчастих теплообмінників призводить до зростання аеродинамічного опору, зниження температурного коефіцієнта ефективності й ризику аварійної зупинки системи. Багатофакторна природа цього явища вимагає комплексної стратегії запобігання, яка охоплює етапи прогнозування (моделювання), моніторингу та оцінки експлуатаційної поведінки обладнання.

Аналіз інженерно-автоматизованих підходів до протидії обмерзанню довів, що найбільш ефективні рішення базуються на поєднанні пасивних і активних методів – байпасних каналів, попереднього підігріву, захисних антиобмерзальних покриттів – із високотехнологічними засобами, зокрема термоелектричними модулями (ТЕМ) та предикативним керуванням на основі MPC. Використання багатоканальних сенсорних систем та адаптивних алгоритмів регулювання дає змогу зменшити енерговитрати, підтримувати стабільний режим роботи та знижувати ризик критичних відмов обладнання навіть за різких коливань зовнішніх кліматичних умов.

Отримані результати дослідження підтверджують, що поєднання конструктивних удосконалень, інноваційних матеріалів і цифрових технологій управління створює міцну основу для формування адаптивних HVAC-систем нового покоління. Запропоновані в роботі підходи можуть бути корисними для проєктувальників, виробників кліматичного обладнання та дослідників, зацікавлених у підвищенні надійності, енергоефективності та екологічної збалансованості вентиляційних систем.

Перспективи подальших досліджень. На основі отриманих результатів подальші дослідження доцільно зосередити на вдосконаленні захисту пластинчастих рекуператорів, які є найбільш уразливими до процесів обмерзання за низької температури та високої відносної вологості зовнішнього повітря. Перспективним є поглиблене CFD-моделювання процесів тепло- та масообміну з урахуванням кристалізації вологи, оптимізація LCA/LCC-показників з огляду довговічності та енергоефективності, а також розроблення універсальних моделей MPC із більш досконалими алгоритмами, здатними в реальному часі адаптувати роботу теплообмінника до змінних експлуатаційних режимів. Окремої уваги потребує вдосконалення матеріалів і геометрії теплообмінних поверхонь, інтеграція ТЕМ-модулів та впровадження багатоканальних сенсорних мереж для забезпечення високої точності моніторингу та мінімізації ризиків обмерзання. Комплексне поєднання цих напрямів сприятиме створенню більш довговічних і енергоефективних вентиляційних систем, здатних забезпечувати стабільну роботу навіть за складних режимів експлуатації та підвищених вимог до надійності.

References

1. Tracking Clean Energy Progress 2023 – Analysis - IEA, www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023. Accessed 17 June 2025.
2. “Energy Performance of Buildings Directive.” Energy. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en. Accessed 17 June 2025.
3. Directive 2010/31/eu of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), The European Parliament and the Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/2021-01-01>. Accessed 19 June 2025.
4. Bai, H.Y., et al. “A Review of Heat Recovery Technologies and Their Frost Control for Residential Building Ventilation in Cold Climate Regions.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 162, July 2022, p. 112417. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112417>.
5. Kragh J., Rose J., Svendsen S. Mechanical ventilation with heat recovery in cold climates. *Proceedings of the Seventh Nordic Symposium on Building Physics in Nordic Countries*. January 2005. 1. ed. Vol. Bind 2. Reykjavik: Oddi hf. 2005.
6. Zender–Świercz, Ewa. “A Review of Heat Recovery in Ventilation.” *Energies*, vol. 14, no. 6, 22 Mar. 2021, p. 1759. <https://doi.org/10.3390/en14061759>
7. O’Connor, Dominic, et al. “A Review of Heat Recovery Technology for Passive Ventilation Applications.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, Feb. 2016, pp. 1481–1493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.039>
8. Elmacioğlu, Helin Ülgen, et al. “Analysis and Design of an Air to Air Heat Exchanger Used in Energy Recovery Systems.” *Journal of Energy Systems*, vol. 6, no. 1, 31 Mar. 2022, pp. 108–130. <https://doi.org/10.30521/jes.962672>
9. Kim, Won Seok. “Design Optimization of Cross-Counter Flow Compact Heat Exchanger for Energy Recovery Ventilator.” *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 30, no. 1, 21 Dec. 2022. <https://doi.org/10.1007/s44189-022-00016-2>
10. Wang, Ya-Nan, et al. “A Study on 3D Numerical Model for Plate Heat Exchanger.” *Procedia Engineering*, vol. 174, 2017, pp. 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.203>
11. Kocabas, Ceyda, and Ahmet Fevzi Savas. “Comparison of Waste Heat Recovery Performances of Plate-Fin Heat Exchangers Produced from Different Materials.” *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 8, 2015, pp. 453–466. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.53109>
12. Li, Jiandong, et al. “Effect of Airflow Rate on Frost Formation and Performance of Membrane Energy Exchangers in Sub-Zero Conditions.” *Applied Thermal Engineering*, vol. 236, Jan. 2024, p. 121639.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121639>

13. Erlandsson, Martin, and Mathias Borg. "Generic LCA-Methodology Applicable for Buildings, Constructions and Operation Services–Today Practice and Development Needs." *Building and Environment*, vol. 38, no. 7, July 2003, pp. 919–938. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00031-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00031-3)

14. Nyman, Mikko, and Carey J. Simonson. "Life Cycle Assessment of Residential Ventilation Units in a Cold Climate." *Building and Environment*, vol. 40, no. 1, Jan. 2005, pp. 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.011>

15. Rabani, Mehrdad, et al. "Hybrid Ventilation Systems for Reduced Lifetime Emissions in Cold Climates." *E3S Web of Conferences*, vol. 562, 2024, p. 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456202002>

16. Hu, Xinyi, et al. "Economic and Environmental Impacts of Different Ventilation Systems in Detached Rural Houses in Severe Cold Climate." *Journal of Building Engineering*, vol. 99, Apr. 2025, p. 111689. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111689>

17. Byun, Sungjoon, et al. "Frost Formation from General-Low to Ultra-Low Temperatures: A Review." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 195, Oct. 2022, p. 123164. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123164>

18. Agopian N. "ERV & HRV Frost Thresholds and Control Methods." *RenewAire Energy Recovery Ventilation*. 25 February, 2022. <https://renewaire.com/wp-content/uploads/2025/07/MAR-LIT-165-RGB-WhitePaper-FrostControl-web.pdf>. Accessed 25 June 2025.

19. Pomianowski, Michal Zbigniew, et al. "Experimental Investigation of Frost Formation on Air to Air Counter Flow Heat Exchanger in Air Handling Unit and Climatic Influence on Dry, Wet, Frost Operation Condition." 40th AIVC, 8th TightVent & 6th venticool Conference Proceedings: From Energy crisis to sustainable indoor climate – 40 years of AIVC. AIVC, 15-16 October 2019. <https://www.aivc.org/resource/experimental-investigation-frost-formation-air-air-counter-flow-heat-exchanger-air-handling>. Accessed 25 June 2025.

20. Ouazia, Boualem, et al. Frost Resilient Energy Recovery Ventilation System for Dwellings in Canada's North and Arctic: A Comparative Study between a Regenerative Dual Core and Conventional Single Core Systems, SSRN Scholarly Paper 5025791. Rochester, NY: Social Science Research Network, 19 Nov 2024. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5025791>

21. Jedlikowski, Andrzej, and Sergey Anisimov. "Analysis of the Frost Formation and Freeze Protection with Bypass for Cross-Flow Recuperators." *Applied Thermal Engineering*, vol. 116, Apr. 2017, pp. 731–765. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.105>

22. He, Hua, and Zhiguang Guo. "Superhydrophobic Materials Used for Anti-

Icing Theory, Application, and Development.” *iScience*, vol. 24, no. 11, Nov. 2021, p. 103357, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103357>

23. He, Hui, et al. “Enhancing Heat-Exchanger Performance in Frost Conditions via Superhydrophobic Surface Modification.” *Applied Thermal Engineering*, vol. 246, June 2024, p. 122914. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122914>

24. Losada, Ricardo, et al. “Coatings to Prevent Frost.” *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 13, no. 4, 27 Apr. 2016, pp. 645–653. <https://doi.org/10.1007/s11998-016-9809-1>

25. Ridings, Erik, et al. “Performance Assessment of a Thermoelectric Heat Pump Heat Recovery Ventilator.” *E3S Web of Conferences*, vol. 521, 2024, p. 01006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452101006>

26. Yilmazoglu, M. Zeki. “Experimental and Numerical Investigation of a Prototype Thermoelectric Heating and Cooling Unit.” *Energy and Buildings*, vol. 113, Feb. 2016, pp. 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.046>

27. Diaz de Garayo, S., et al. “Prototype of an Air to Air Thermoelectric Heat Pump Integrated with a Double Flux Mechanical Ventilation System for Passive Houses.” *Applied Thermal Engineering*, vol. 190, May 2021, p. 116801. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116801>

28. Diaz de Garayo, S., A. Martínez, and D. Astrain. “Optimal Combination of an Air-to-Air Thermoelectric Heat Pump with a Heat Recovery System to HVAC a Passive House Dwelling.” *Applied Energy*, vol. 309, Mar. 2022, p. 118443. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118443>

29. Kemjariya, Sucha, et al. “Designing MPC Controller for a Heat Exchanger Equipped with Thermoelectric Generators.” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2261, no. 1, June 2022, p. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2261/1/012007>

30. Galčíková, Lenka, and Juraj Oravec. “Self-Tunable Approximated Explicit MPC: Heat Exchanger Implementation and Analysis.” *Journal of Process Control*, vol. 140, Aug. 2024, p. 103260. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jprocont.2024.103260>

31. Mostafavi, Saman, et al. “Nonlinear Moving Horizon Estimation and Model Predictive Control for Buildings with Unknown HVAC Dynamics.” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 41, 2022, pp. 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.01.105>

32. Andersen, Andreas Hyrup, and Muhyiddine Jradi. “Multi-Objective Optimization of Building Ventilation Systems Using Model Predictive Control: Integrating Air Quality, Energy Cost, and Environmental Impact.” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 1, 6 Jan. 2025, p. 451. <https://doi.org/10.3390/app15010451>

33. Alekseik, Yevhenii, and Olha Alekseik. “Designs of Heat Exchanger Devices on Two-Phase Heat Transfer Elements for Air Heat Disposal in Ventilation Systems: Overview.” *KPI Science News*, no. 1–2, 25 Sept. 2022, pp. 11–25. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.264595>
34. Didyk, L. V., and M. V. Stepanov. “Metodyka rozrakhunku teploobminnyka z elastychnoiu poverkhnei teploperedachi dla utylizatsii tepla vytiazhnogo povitria ” *Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohazopostachannia: nauk.-tekhn. zb.*, no. 16, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2012, pp. 94–100. <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/10768>. (in Ukrainian).
35. Stepanov, M. V., and V. V. Koval. “Rekuperatyvni teploobminnyky z polietilenovoiu teploperedaiuchoiu poverkhnei.” *Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohazopostachannia: nauk.-tekhn. zb.*, no. 8, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2005, pp. 81–84. <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/8969>. (in Ukrainian).
36. Kordiukov, M. I., V. I. Deshko, and I. O. Sukhodub. “Osoblyvosti protsesiv teplo masoobminu rekuperatyvnogo membrannoho teploobminnyka «povitria-povitria» v litnii period.” *Refrigeration Engineering and Technology*, vol. 50, no. 1, Odesa National Technological University, 2014, pp. 24–31. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.1/2014.32643>. (in Ukrainian).
37. Pavlenko, V., and Volianyk. “Investigation of Recuperator Efficiency Using in Residential Premises.” *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Science Series*, vol. 136, no. 4, 18 Nov. 2019, pp. 77–85, <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.8>.
38. Pavlenko, V., and Volianyk. “Investigation of Recuperator Efficiency Using in Residential Premises.” *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Science Series*, vol. 136, no. 4, 18 Nov. 2019, pp. 77–85, <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.8>.
39. Savin, V.V., and P.S. Kirichenko. “Recuperators as a Way to Improve the Efficiency of Systems Mechanical Ventilation Systems in Terms of Energy Saving in Buildings.” *Jornal of Kryvyi Rih National University*, no. 56, 2023, pp. 104–109. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-104-109>
40. Voloshchuk, Volodymyr, and Mariya Polishchuk. “Exergy-Based Control Strategy in a Dwelling Ventilation System with Heat Recovery.” *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, vol. 10, no. 2, 30 June 2020, pp. 44–47. <https://doi.org/10.35784/iapgos.933>

UDC 697.9:536.2:620.97:681.5(045)

PhD student **Andrii Podliesnyi**,

andreypodlesniy21@gmail.com, ORCID: 0009-0009-2175-4307,

Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof. **Anatolii Petrenko**,

petrenko_ao@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0406-9852,

Ukrainian State University of Science and Technologies

SEI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.52-75>

HEAT RECOVERY IN VENTILATION SYSTEMS: A REVIEW OF MODERN TECHNOLOGIES, ENERGY EFFICIENCY, AND FROST PROTECTION

Abstract. *This article presents a systematic review of contemporary heat recovery technologies in ventilation systems, with a particular focus on their energy efficiency and operational reliability under low-temperature outdoor conditions. The review provides a general classification and structural features of heat recovery units, methods for improving thermodynamic performance and reducing aerodynamic resistance, as well as CFD modelling of heat and mass transfer processes for predicting temperature fields, humidity distribution, and pressure losses. The methodological framework of the study was based on the analysis of recent international and national publications, covering both experimental research and numerical models, alongside the assessment of system efficiency using life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) indicators, thereby integrating energy, environmental, and economic aspects of operation. Special attention is paid to the problem of frost formation on heat exchange surfaces in cold climates, particularly in plate heat exchangers, which are most susceptible to phase transitions of moisture and subsequent frost accumulation. The physical mechanisms of this process and its consequences for system performance are examined, including increased aerodynamic resistance and reduced efficiency. Furthermore, existing engineering and automated anti-frost strategies are analysed, encompassing both passive and active solutions (bypass channels, preheating, anti-frost coatings) as well as advanced approaches based on thermoelectric modules (TEM), multi-sensor systems, and model predictive control (MPC). The findings confirm that the efficiency of heat recovery systems is determined by the combination of structural improvements, innovative materials, and digital control technologies. The proposed approaches may be valuable for HVAC designers, manufacturers, and researchers, while also highlighting promising avenues for further research on enhancing plate heat exchangers and developing intelligent control systems for climate equipment in cold climates.*

Keywords: *ventilation systems, heat recovery, recuperation, plate heat exchangers, energy efficiency, cold climate, frost formation, control*

Received/Надійшла до редакції 22.09.2025

Reviewed/Рецензована 05.11.2025

Accepted/Прийнята 26.11.2025