

УДК 628.8:681.51:725.4

д.т.н., проф. **Олександр Лапшин**,  
alexandr.lapshyn2017@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3586-9411

аспірант **Ганна Ярошенко**,  
yaroshenkoanna572@gmail.com, ORCID: 0009-0009-0293-4134

**Криворізький національний університет**

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.40-58>

## **ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНИМ РЕЖИМОМ ПРОМИСЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ НА БАЗІ КООКСІАЛЬНОЇ РЕКУПЕРАЦІЇ ТА БАГАТОШАРОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ**

***Анотація.** У сучасних умовах експлуатування промислових об'єктів, що характеризуються високою інтенсивністю тепловиділень від технологічного обладнання та мінливими показниками вологості, забезпечення стабільного мікроклімату є критично важливим завданням. Традиційні системи загальнообмінної вентиляції та кондиціювання повітря, що працюють у фіксованих режимах, часто не здатні ефективно компенсувати динамічні коливання тепловологісних навантажень. Це призводить до перевитрат енергоресурсів, порушення технологічних процесів, нестабільного режиму осушення або зволоження повітря, а також створює ризики для здоров'я та безпеки персоналу. Ситуація додатково ускладнюється глобальними вимогами щодо декарбонізування та необхідністю жорсткого заощадження енергетичних ресурсів в умовах післявоєнного відновлення інфраструктури, що вимагає впровадження інноваційних циркулярних рішень. Дослідження пропонує комплексне інженерне рішення, яке полягає у розробленні та впровадженні автоматизованої системи керування тепловологісним режимом. Запропонована система базується на інтеграції коаксіальних вентиляційних каналів із функцією адаптивної рекуперації теплоти та інноваційного багатошарового теплоізоляційного мату. Окрему увагу приділено розробленню гібридної стратегії керування, що поєднує локальні контури пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання з алгоритмами прогнозного керування верхнього рівня, які використовують дані з розгалуженої сенсорної мережі. Ці мережі фіксують температуру, відносну вологість, концентрацію діоксиду вуглецю та перепад тиску. Математичне моделювання та техніко-економічний аналіз продемонстрували, що впровадження комбінованого підходу дозволяє знизити енергоспоживання системи на 20...30 % порівняно з традиційними аналогами. Використання теплоізоляційного мату забезпечує*

*ефективність теплопоглинання на рівні 75...80 %, мінімізуючи непродуктивні втрати енергії. Доведено, що керована рекуперація виступає не лише інструментом енергоефективності, але й дієвим механізмом стабілізування параметрів припливного повітря в умовах мінливих зовнішніх умов.*

**Ключові слова:** *промислова вентиляція, рекуперація теплоти, коаксіальний повітропровід, багатошарова теплоізоляція, сенсорна мережа, адаптивне керування, енергоефективність, мікроклімат.*

**Вступ.** Забезпечення жорстко регламентованих параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях є фундаментальною передумовою для підтримання стабільності та точності перебігу технологічних процесів, високого рівня продуктивності та працездатності персоналу з запобіганням професійним захворюванням. Сучасні тенденції розвитку промисловості – зокрема у гірничо-металургійній, хімічній, машинобудівній та харчовій галузях – характеризуються суттєвим ущільненням технологічного обладнання. Високотемпературні агрегати, як-от екструдери, сушильні камери та нагрівальні резервуари, утворюють масивні локальні теплові потоки, що передаються до простору цеху шляхом конвекції та потужного інфрачервоного випромінювання. Надлишок теплоти разом з технологічними вологовиділеннями формує складну, високоінерційну та динамічно змінну термодинамічну систему, яка часто перевищує асиміляційні можливості традиційних систем загальнообмінної вентиляції.

Класичні підходи до проектування промислової вентиляції, які покладаються на фіксовані обсяги повітрообміну, виявляють свою повну неефективність в умовах змінних навантажень. У теплий період року виникає загроза критичного перегрівання робочої зони, що порушує санітарно-гігієнічні нормативи та створює ризик теплових ударів. Натомість у холодний період року експоненційно зростають витрати теплової енергії на підігрівання припливного повітря, необхідного для розбавлення та видалення промислових забруднювачів. Відсутність раціонального керування та ефективною рекуперації скидної теплоти зумовлює значні втрати енергоресурсів [1].

Особливої гостроти проблема енергоефективності інженерних систем набуває в специфічних економічних та інфраструктурних реаліях сьогодення, зокрема в контексті глобальних вимог щодо декарбонізування та безпрецедентних викликів, пов'язаних із післявоєнною розбудовою енергетичної інфраструктури України. Масштабні руйнування генераційних потужностей, зокрема теплових та гідроелектростанцій, зумовили стійкий структурний дефіцит в об'єднаній енергосистемі, що змушує промисловий сектор шукати інноваційні шляхи зниження питомої енергомісткості виробництва [2]. Використання рекуперативних енергетичних рішень, зокрема

утилізація скидної теплоти за допомогою коаксіальних (співвісних) теплообмінників, інтегрованих із високоефективними багатошаровими ізоляційними матеріалами, виступає не просто як економічно доцільний захід, а як фактор виживання та конкурентоспроможності промислових підприємств на європейському ринку.

Незважаючи на активний розвиток технологій рекуперації, питання забезпечення стабільності теплообмінних процесів безпосередньо в просторі гарячих цехів залишається недостатньо вивченим. Металеві повітропроводи без спеціалізованої теплоізоляції працюють як небажані радіатори. Так, взимку вони втрачають теплоту, утилізовану рекуператором, а влітку поглинають променеву теплоту від печей з перегріваннями припливного повітря ще до того, як воно досягне робочої зони працівників. Відповідно, постановка проблеми зводиться до необхідності створення синергетичного інженерного комплексу, який би поєднував аеродинамічно доцільну геометрію рекуператора, теплофізичні властивості інноваційних композитних теплоізоляторів (теплоізоляційних матів) та автоматизовані алгоритми прогнозного керування тепловологісним режимом на основі розгалуженої сенсорної мережі.

**Актуальність дослідження.** Проблематика оптимізування систем вентиляції, глибинної утилізації скидної теплоти та формування адаптивних алгоритмів управління інженерними мережами знаходиться у фокусі постійної уваги вітчизняної та світової наукової спільноти. Аналіз сучасних наукових публікацій дозволяє виокремити декілька провідних напрямків досліджень, що формують теоретичний та експериментальний базис для розроблення новітніх кліматичних систем, а також ідентифікувати наявні недоліки та прогалини.

Фундаментальні експлуатаційні параметри систем вентиляції в цивільному та індустріальному секторах розкрито в ґрунтовному огляді досліджень [1], [3], де здійснено комплексний аналіз перспектив модернізації наявних мереж. Автори переконливо доводять, що перехід до інтелектуальних систем із керованою швидкістю потоку дозволяє суттєво підвищити продуктивність обладнання. Водночас їхнє дослідження переважно фокусується на питаннях чистоти повітря та фільтруванні, тоді як аспекти термодинамічної взаємодії повітряних потоків з нагрітими поверхнями цеху залишаються поза увагою.

Схожий підхід, але адаптований до умов постпандемічної експлуатації будівель застосовано в роботі [4]. У своєму огляді автори доводять високу ефективність стратегії зональної вентиляції з керуванням за потребою, яка завдяки інтеграції з алгоритмами штучної нейронної мережі дозволяє балансувати між швидким видаленням забруднювачів та заощадженням енергії, що зменшує енерговитрати до 34 %. Недоліком цієї моделі є її орієнтованість на біологічні забрудники та відносно стабільні офісні умови, що робить її пряме

перенесення на промислові об'єкти зі значними тепловими викидами технічно нераціональним.

Соціально-економічний вектор модернізування інженерних систем у контексті енергетичної безпеки всебічно досліджено колективом авторів роботи [2]. Шляхом опитування та аналітичного моделювання вони встановили, що понад 64 % фахівців і громадян визначають використання енергоощадних технологій абсолютним пріоритетом повоєнної розбудови енергосектору України. Споріднений аналіз стану національної енергетики проведено у праці Д. Бойка, де наголошується на критичній вразливості наявної архітектури теплопостачання та необхідності впровадження децентралізованих рекупераційних рішень [5]. Ці дослідження формують міцне економічне підґрунтя, однак відсутні пропозиції специфічних конструктивних інструментів для реалізування цих пріоритетів на рівні окремого промислового повітропроводу. Власне економічний розрахунок впровадження модернізованих систем на мікрорівні деталізовано в публікації [6], які на прикладі автоматизованих теплових пунктів продемонстрували можливість щоденної економії значних фінансових ресурсів, зокрема зменшення споживання з 47,24 ГДж до 36,99 ГДж на добу завдяки усунення перевитрат енергії.

Великий пласт наукових досліджень стосується безпосередньо технологій рекуперації теплоти. У роботі [7] досліджено енергоефективні системи теплопостачання на основі рідинно-парових ежекторів. Технологія струминного термокомпресування дозволяє ефективно утилізувати низькопотенційну теплоту, що є безперечним кроком уперед порівняно з класичними парокомпресійними циклами. Проблема інтенсифікування тепломасообміну в промислових грануляційних вежах досліджується у праці [8], де автори розробили математичну модель теплообміну між гранулами мінеральних добрив та повітряним потоком, довівши, що оптимізація швидкості потоку критично впливає на рівномірність температурного поля. Обидві праці [7], [8] демонструють високий рівень теплофізичного аналізу, але запропоновані апарати є надзвичайно специфічними і не можуть бути легко масштабовані для завдань загальнообмінної вентиляції.

Розв'язання проблеми обмерзання та самоочищення теплообмінників у складних умовах експлуатації запропоновано у роботі [9]. Досліджено адаптивний тритрубний теплоутилізатор для систем мікроклімату тваринницьких приміщень. Підтверджено високу стійкість коаксіальних конструкцій до агресивних середовищ. Хоча дослідження фокусується на агропромисловому секторі, аеродинамічні принципи тритрубно-коаксіальної системи є надзвичайно релевантними для задачі, що розглядається. Схожі висновки щодо доцільності ентальпійних теплообмінників містяться в статті

[10], де акцент зроблено на збереженні вологи в зимовий період для запобігання низької відносної вологості повітря. Інтеграція гібридних систем розкрита в дослідженнях [11], а також [12], які аналізують оптимізацію повітрообміну в термомодернізованих будівлях. Їхні дані свідчать, що пасивна або гібридна тяга є недостатньою для подолання теплових надлишків промислових виробництв без активного механічного підтримання та ретельного моделювання турбулентності, як це показано в роботі [13]. Інноваційні пасивні елементи, наприклад, стіни Тромба, досліджує К. Миронюк. Підтверджено, що архітектурна форма здатна частково знімати теплове навантаження [14].

Щодо застосування багатошарової теплової ізоляції – критично важливого елементу для запобігання втратам тепла у вентиляційних каналах – наявні дослідження зосереджені переважно на фасадах будівель. У роботі [15] доведено, що розташування ізоляційного шару фундаментально впливає на коефіцієнт затухання та часове затримання теплопередачі, а дослідження [16] показало, що збільшення товщини зовнішньої ізоляції значно знижує зимове навантаження на опалення, але має обмежений ефект влітку. Ці висновки підкреслюють необхідність створення спеціалізованої теплоізоляції саме для інженерних комунікацій всередині будівель.

Спроби створення таких матеріалів зафіксовані в українських патентах. Зокрема, відомий теплоізоляційний мат "Фольгохолст" [17], який складається з шару неорганічної ізоляції товщиною 50 мм. Його критичним недоліком є відсутність двобічного армування, що призводить до розпорошування теплоізоляційного шару під дією вібрацій від вентиляторів. Як альтернативу, пропонується застосування удосконаленого теплоізоляційного мата, де поєднано прогумовану тканину, алюмінієву фольгу та набивку з мінеральної вати, армовану оцинкованою сіткою та прошиту скляними нитками. Дана конструкція забезпечує зменшення теплопередачі на рівні 75–80%. Однак, у науковій літературі відсутні дослідження, які б розглядали цей мат не просто як пасивну ізоляцію труб, а як активний елемент оптимізування рекупераційного циклу вентиляційної системи.

У сфері математичного моделювання комбінованих енергетичних та екологічних процесів слід відзначити працю [18], у якій розроблено формалізовані моделі очищення стічних вод із застосуванням кінетики Голдейна, а також дослідження [19] і [20] щодо гідротермального та геотермального централізованого теплопостачання низької температури. Ці роботи доводять, що багатокритеріальне оптимізування та зниження температурного графіка теплоносія є визначальними для енергоефективності.

Сучасним стандартом автоматизованого управління теплотехнічними системами стає метод прогнозного керування, переваги якого системно

викладені в оглядовій роботі [21]. Проте, аналіз показує брак прикладних моделей прогнозного керування, розроблених спеціально для коаксіальних рекуператорів з урахуванням динаміки точки роси та змінної геометрії заслінок (байпасування).

Таким чином, критичний огляд актуальних вітчизняних та зарубіжних наукових джерел дозволяє зробити висновок, що більшість досліджень розглядають процеси загальнообмінної вентиляції, утилізації скидної теплоти, теплової ізоляції та автоматизації розрізнено, як ізольовані підсистеми. Відсутні комплексні науково-технічні рішення та математичні моделі, які б одночасно інтегрували фізико-механічну конструкцію коаксіального двопровідного рекуператора, термодинамічні переваги запатентованих композитних теплоізоляційних матів та автоматизовані алгоритми адаптивного прогнозного керування на основі розгалуженої сенсорної мережі. Зазначена прогалина обґрунтовує актуальність і необхідність проведення даного дослідження.

**Формулювання цілей статті.** Зважаючи на виявлені в ході аналізу літератури недоліки наявних підходів, головною метою цієї статті є розроблення, теоретичне обґрунтування та оцінювання ефективності інтегрованої системи адаптивного керування тепловологічним режимом промислових приміщень, яка поєднує в собі конструктивні засоби коаксіальної рекуперації теплоти, інноваційну багатошарову ізоляцію та прогнозні алгоритми автоматизації.

Для досягнення вказаної загальної мети сформульовано завдання:

1. Розробити та обґрунтувати архітектуру комбінованої системи вентиляції на базі коаксіального повітропроводу, що здатний забезпечити суміщення функцій припливу, локальної витяжки та вбудованої утилізації скидної теплоти технологічних агрегатів;
2. Математично описати та інтегрувати в систему удосконалений багатошаровий теплоізоляційний мат (на основі мінеральної вати, фольги та армувальної сітки) з оцінюванням його впливу на блокування радіаційного теплообміну та мінімізування втрат ефективності рекуперації;
3. Сформувати алгоритмічну модель гібридного адаптивного керування, яка оперує даними розгалуженої сенсорної мережі з обов'язковим динамічним розрахунком точки роси для запобігання конденсації;
4. Здійснити імітаційне техніко-економічне та термодинамічне моделювання запропонованого комплексу в різних сезонних умовах з метою визначення потенціалу енергоефективності та строку окупності інвестицій.

Новизна дослідження полягає у синергетичному поєднанні інноваційних матеріалознавчих розробок з аеродинамічними перевагами коаксіальних труб та

цифровими алгоритмами керування, що дозволяє перетворити систему вентиляції з пасивного споживача енергії на активний інструмент енергетичного менеджменту промислового цеху.

**Основні етапи дослідження.** Методологічна основа дослідження базується на інтеграції фундаментальних законів термодинаміки, механіки суцільних середовищ (гідрогазодинаміки), теорії тепломасообміну та методів сучасної теорії автоматичного керування. Для комплексного вирішення поставлених завдань дослідження розділено на три взаємопов'язані етапи:

1. Проектування фізико-геометричної моделі теплообмінної системи;
2. Моделювання термодинамічних процесів у багатошаровій ізоляції;
3. Синтез алгоритму прогнозного керування на базі мережі сенсорів.

**Перший етап: архітектура та газодинаміка коаксіального теплообмінника.** Запропонована система (рис. 1) складається з коаксіального (співвісного двоканального) повітропроводу завдовжки  $L$ , м, що прокладається по всій довжині гарячого цеху безпосередньо над технологічним обладнанням. Геометрія системи передбачає, що забруднене, високотемпературне повітря відводиться назовні через центральну (внутрішню) трубу з діаметром  $D_{in}$ , м, тоді як зовнішнє припливне повітря подається через зовнішній кільцевий простір, обмежений зовнішньою трубою діаметром  $D_{out}$ , м. Подібна конфігурація забезпечує постійний протитечійний або прямотечійний теплообмін за всією довжиною магістралі.

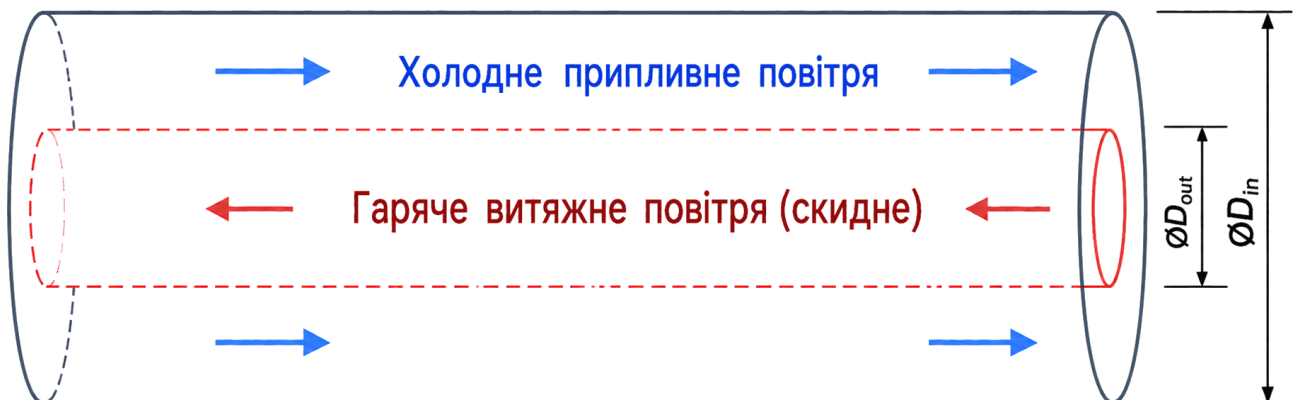


Рис. 1. Схема коаксіального (співвісного двоканального) повітропроводу

Гідродинамічний режим руху повітряних мас описується числом Рейнольдса. Для кільцевого перерізу еквівалентний гідравлічний діаметр визначається як  $D_h = D_{out} - D_{in}$ . Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина повітря,  $\nu$  – швидкість потоку, м/с;  $\mu$  – динамічна в'язкість, Па·с. В умовах промислової вентиляції число Рейнольдса гарантовано перевищує критичне значення 4000, що свідчить про розвинений турбулентний режим. Це інтенсифікує конвективний теплообмін, коефіцієнт  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) якого визначається через критерій Нуссельта за рівнянням Діттуса-Белтера:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D_h}{\lambda_{air}} = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n, \quad (2)$$

де  $\lambda_{air}$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $Pr$  – число Прандтля, а показник степеня  $n = 0,4$  для нагрівання припливного повітря і  $n = 0,3$  для охолодження витяжного.

Потужність теплового потоку  $Q$ , Вт, що рекуперується між витяжним та припливним каналами, підпорядковується рівнянню теплопередачі:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta T_{LMT}, \quad (3)$$

де  $K$  – лінійний коефіцієнт теплопередачі коаксіальної труби, Вт/(м·К), який враховує опір теплопередачі металевій стінці та конвективні опори з обох боків;

$F$  – площа поверхні теплообміну внутрішньої труби,  $\Delta T_{LMT}$  – середньологарифмічна різниця температури між потоками.

Аеродинамічний опір системи  $\Delta P$ , який безпосередньо впливає на споживання електроенергії вентиляторами, розраховується за формулою Дарсі-Вейсбаха з урахуванням коефіцієнта опору тертя  $f$  і коефіцієнтів місцевих опорів  $\zeta$

$$\Delta P = \left( \lambda_{fr} \cdot \frac{L}{D_h} + \sum \zeta \right) \cdot \rho \frac{v^2}{2}. \quad (4)$$

**Другий етап. Термодинамічна модель багат шарового теплоізоляційного мата.** Щоб рекуперована теплота не втрачалася в навколишнє середовище взимку, а влітку – щоб припливне повітря не нагрівалося від інфрачервоного випромінювання печей цеху, – зовнішня поверхня труби екранується багат шаровим теплоізоляційним матом (рис. 2), створеним за такими принципами:

1. Теплопоглинальний шар є набивкою з мінеральної вати з волокнами завтовшки 3...6 мкм, що забезпечує високу пористість та низький коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,035 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;
2. Армувальний шар – це оцинкована сталева сітка, що охоплює мінеральну вату з обох боків і прошивається скляними нитками. Цей шар бере на себе механічні навантаження, перешкоджаючи злежуванню та руйнуванню теплоізоляції під впливом вібрацій;
3. Тепловідбивний шар складається з прогумованої тканини з наклеєним листом алюмінієвої фольги (ступінь чорноти  $\varepsilon \approx 0,04$ ).

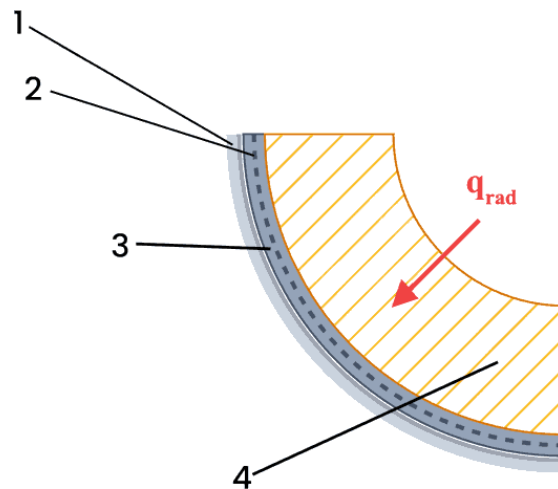


Рис. 1. Схема багатшарового теплоізоляційного мату:

1 – алюмінієва фольга; 2 – армувальна сітка; 3 – мінеральна вата; 4 – стінка внутрішнього повітропроводу

Модель тепломасообміну в маті враховує як теплопровідну, так і інфрачервону складові. Густина теплового потоку  $q_{rad}$ ,  $\text{Вт/м}^2$ , від гарячого обладнання цеху з температурою поверхні  $T_{equip}$ , К, на зовнішню поверхню повітропроводу з температурою  $T_{surf}$ , К, розраховується за законом Стефана-Больцмана:

$$q_{rad} = \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot (T_{equip}^4 - T_{surf}^4), \quad (5)$$

де  $\varepsilon_{eff}$  – коефіцієнт, який враховує ступені чорноти поверхонь;  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана.

Згідно з результатами експериментальних оцінювань, завдяки низькій теплопровідності та мікропористій структурі мінеральної вати, яка знерухоплює повітря між волокнами та практично усуває внутрішню конвекцію, мат забезпечує зниження тепловтрат теплопровідністю та

конвекцією на 75–80 %. Водночас зовнішній фольгований шар (із низьким ступенем чорноти  $\varepsilon \approx 0,04$ ) працює як радіаційний екран і відбиває до 96 % інфрачервоного випромінювання від гарячого внутрішнього повітропроводу, щоб не дозволити променевій теплоті нагрівати припливне повітря влітку. Сумарний опір теплопередачі циліндричної ізоляції  $R_{ins}$  на один погонний метр розраховується як

$$R_{ins} = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^m \frac{1}{2\lambda_i} \ln\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right) + R_f, \quad (6)$$

де  $\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності  $i$ -го шару з внутрішнього боку, Вт/(м·К);  $d_i$  – діаметр межі шарів, що відраховується з внутрішнього боку;  $m$  – кількість шарів ( $d_{m+1}$  – зовнішній діаметр зовнішнього шару)

**Третій етап. Алгоритм гібридного прогнозного керування на базі сенсорної мережі.** Фізичне оптимізування вентиляційного каналу було б неповним без відповідної системи диспетчеризації. Для компенсування високої теплової інерційності цеху розроблено алгоритм прогнозного керування, ефективність якого в системах формування мікроклімату підтверджена світовим досвідом. Система (рис. 3) оснащується розгалуженою мережею датчиків температури ( $T_{out}$ ,  $T_{in}$ , припливного повітря  $T_{SUP}$ , витяжного повітря  $T_{ETA}$ ), відносної вологості ( $RH$ , %), концентрації шкідливих домішок (наприклад  $CO_2$ , ppm) для зонального керування за потребою, а також, диференційні пресостати для контролювання забруднення фільтрів.

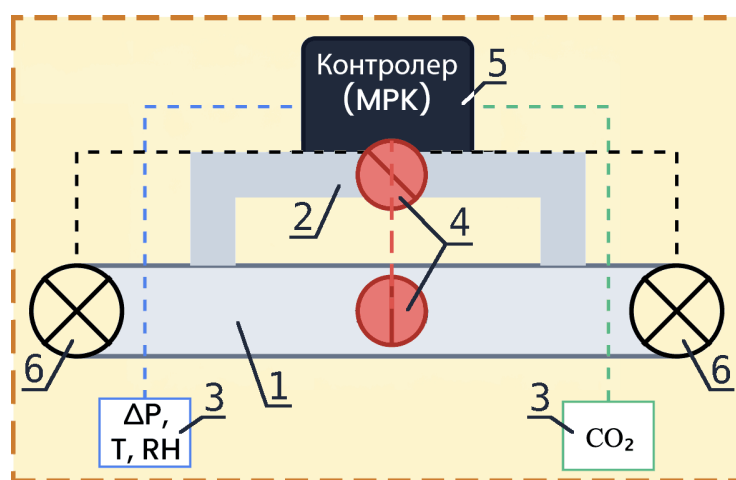


Рис. 3. Принципова схема вентиляції з автоматизацією:

- 1 – рекуператор (двоканальний повітропровід); 2 – байпас; 3 – датчики;
- 4 – клапани регулювання; 5 – контролер; 6 – вентилятори

Ключовою математичною особливістю алгоритму є перехід від прямого керування за показниками відносної вологості до динамічного обчислення температури точки роси  $T_{dp}$ , К, за формулою Магнуса:

$$T_{dp} = \frac{243,12 \cdot \gamma(T, RH)}{17,62 - \gamma(T, RH)}, \quad (7)$$

де  $\gamma(T, RH)$  – функція

$$\gamma(T, RH) = \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T}, \quad (8)$$

Контролер постійно порівнює температуру поверхні конструкцій з  $T_{dp}$ . Якщо виникає ризик утворення конденсату, алгоритм заздалегідь збільшує витрату зовнішнього повітря або змінює позицію байпасних заслінок.

Верхній рівень моделі прогнозного керування оптимізує цільову функцію  $J$ , що мінімізує сумарні витрати електроенергії протягом горизонту прогнозування  $N_p$ , з урахуванням втрат за відхилення температури від комфортної зони:

$$J = \sum_{k=1}^{N_p} \left( w_E \cdot E(k) + w_T \cdot (T(k) - T_{set})^2 + w_C \cdot (CO_2(k) - CO_{2max})^2 \right), \quad (9)$$

де  $w_E$ ,  $w_T$ ,  $w_C$  – вагові коефіцієнти значущості енергії, температури та якості повітря відповідно. На нижньому рівні розраховані налаштування передаються на регулятори частотних перетворювачів двигунів вентиляторів.

Працездатність розробленої комплексної методології була верифікована шляхом імітаційного термодинамічного та економічного моделювання для умовного виробничого цеху зі стабільним технологічним повітрообміном на рівні 10 000 м<sup>3</sup>/год. Результати дослідження згруповано за аспектами сезонної адаптивності, енергетично-економічної ефективності та динамічної стійкості.

Традиційні вентиляційні установки не здатні однаково ефективно справлятися з літніми максимумами та зимовими мінімумами. Розроблена адаптивна система демонструє високу гнучкість, змінюючи логіку перебігу потоків залежно від метеорологічних показань та внутрішніх сенсорів. Дані щодо операційних режимів зведено у табл. 1.

Таблиця 1.

**Матриця операційних алгоритмів інтегрованої системи вентиляції за сезонами року**

Параметр	Режим		
	зимовий	перехідний	літній
	Температура зовнішнього повітря, К (°С)		
	< 268,15 (< – 5)	278,15...288,15 (5...15)	≥ 298,15 (≥ 25)
Рекуперація тепла	100 % припливного потоку проходить крізь зовнішній простір коаксіального рекуператора	Змінна (від 20 % до 50 %), часткове відкриття байпасу для вільного охолодження	Мінімальна. Байпас повністю відкритий, щоб гаряче витяжне повітря не гріло припливне
Теплове оброблення повітря	За потреби вмикається повітрянагрівач	Система працює в режимі вільного охолодження	Вмикаються адіабатичні панелі охолодження
Вентилятори та повітрообмін	Робота на номінальній або мінімально допустимій швидкості (за давачами )	Швидкість змінюється плавно відповідно до добових коливань температури	Форсоване подавання
Вплив ізоляційного мату	Утримує 100% отриманої в рекуператорі теплоти від розсіювання назовні	Згладжує теплові коливання всередині повітропроводу	Блокує 75-80 % променевого випромінювання від печей, запобігаючи нагріву припливу

У зимовий період температурний коефіцієнт ефективності рекуператора досягає максимальних значень (до 50-60 %). Наприклад, зовнішнє повітря з температурою 253,15 К (– 20 °С), при русі вздовж труби з відпрацьованим повітрям встигає підігрітися до +5...+10 °С лише за рахунок скидної теплоти. Якби система була неізольованою, значна частина цієї теплоти розсіювалася би до верхньої зони цеху. Завдяки ізоляційному мату тепловтрати зведено до мінімуму.

У літню спеку пріоритети змінюються. Коаксіальний рекуператор

перешкоджає асимілюванню теплонадлишків, оскільки гаряче відпрацьоване повітря з цеху підігрівало би припливне повітря. Однак, алгоритм прогнозного керування розпізнає погодні умови та відкриває байпас. Припливне повітря транспортується окремим ізольованим маршрутом. Теплоізоляційний мат у цей час відіграє роль "теплого щита", який завдяки фользі та мінеральній ваті відбиває інфрачервоне випромінювання печей і запобігає нецільовому перегріванню кондиційованого повітря всередині повітропроводу.

**Енергетичне та економічне обґрунтування.** Будь-яка модернізація у сфері промислової вентиляції, особливо в контексті обмежених фінансових ресурсів під час повоєнної реконструкції України, повинна мати чітке техніко-економічне обґрунтування. У табл. 2 наведено порівняння параметрів запропонованої коаксіальної системи та типової припливно-витяжної системи, тобто два окремі повітропроводи без рекуперації.

Таблиця 2.

**Порівняльний техніко-економічний аналіз систем вентиляції  
для повітрообміну 10 000 м<sup>3</sup>/год**

Показник	Типова система вентиляції	Коаксіальна система з теплоізоляційним матом	Розбіжність (ефект)
Оцінкові капітальні витрати, у.о.	100 000	120 000	+ 20 000
Річне споживання енергії на нагрівання та вентиляцію, кВт·год	100 000	80 000	- 20 000
Річні експлуатаційні витрати, у.о./рік	400 000	320 000	- 80 000
Температурний коефіцієнт ефективності рекуператора, %	0	50 – 60	абсолютний приріст
Орієнтовний строк окупності, років	не застосовується	1,5...2	висока рентабельність

З таблиці видно, що впровадження інноваційного рішення збільшує капітальні інвестиції на 20 %. Це пояснюється необхідністю інтеграції коаксіальних труб, спеціалізованих теплоізоляційних матів, датчиків CO<sub>2</sub> та програмованих логічних контролерів для прогнозного керування. Однак, за

рахунок утилізації скидної теплоти, річне споживання енергоресурсів зменшується на 20 %. Відповідно, експлуатаційні витрати різко знижуються, що забезпечує повернення додаткових інвестицій у надзвичайно короткий термін – від півтора до двох років. Цей результат повністю узгоджується із даними емпіричних досліджень вітчизняних вчених, які доводять, що автоматизація теплових вузлів окупається за 4...6 років навіть у цивільному секторі. У промисловості, де градієнти температури значно вищі, окупність настає швидше. Зменшення енергоспоживання на 20 000 кВт·год у масштабах одного цеху вносить суттєвий внесок у декарбонізування та зменшення навантаження на об'єднану енергосистему України, що є критичним фактором для індустрії в умовах енергодефіциту.

Важливим результатом моделювання стало оцінювання поведінки системи в перехідних процесах. У традиційних системах регулятори зазвичай реагують на зміну температури із запізненням. Якщо в цеху відкривається розпечена піч, виникає теплове збурення – температура повітря миттєво зростає, а відносна вологість знижується. Традиційна система починає збільшувати оберти вентилятора лише тоді, коли перегрівання вже зафіксовано датчиком у дальньому кінці приміщення.

Алгоритм прогнозного керування функціює за іншим принципом. Згідно з моделлю прогнозування система миттєво реагує на зростання випромінювання завдяки локальним датчикам. Це дозволяє заздалегідь більше відкрити байпас і форсувати приплив більш холодного зовнішнього повітря. Як наслідок, амплітуда коливань температури в робочій зоні знижується у 2...3 рази.

Одночасно постійний моніторинг точки роси за формулою Магнуса гарантує, що на поверхнях металевого обладнання та коаксіальних повітропроводів не виникне конденсат. Це не лише продовжує строк служби металоконструкцій завдяки запобіганню корозії, але й гарантує безперебійну роботу електронних систем цеху через мінімізування ризику коротких замикань. Застосування теплоізоляційного мату з негорючою мінеральною ватою паралельно виконує функцію підвищення пожежної безпеки, адже блокує поширення полум'я вздовж комунікацій.

Обмеженням запропонованої системи є підвищений аеродинамічний опір коаксіального каналу порівняно зі звичайними гладкими трубами. Це потребує використання високопродуктивних радіальних вентиляторів та ретельного проектування поворотних вузлів і трійників для мінімізування турбулентних втрат тиску.

**Висновки та пропозиції.** Проведене дослідження дозволяє зробити вагомий внесок у вирішення науково-прикладної проблеми оптимізування тепловологісних режимів промислових підприємств шляхом запровадження

інтегрованих енергоефективних технологій управління. Доведено, що системи вентиляції з просторово розділеними каналами припливу та видалення без надійної теплової ізоляції характеризуються критичною неефективністю в умовах промислових теплонадходжень. Це призводить до значних витрат енергії на підігрівання взимку та перевантаження систем кондиціонування повітря влітку. Розроблена інноваційна архітектура системи вентиляції на основі коаксіального повітропроводу, що суміщає функції подавання, видалення повітря та рекуперації теплоти з використанням теплоізоляційного мату, який забезпечує зниження тепловтрат до 75–80 %, дозволяє суттєво знизити енерговитрати на нагрівання та охолодження припливного повітря. Створена математична алгоритмічна модель гібридного прогностного керування, в режимі реального часу оптимізує роботу вентиляторів та заслінок на основі даних сенсорної мережі. Динамічний перерахунок точки роси дозволяє системі уникати конденсації та підтримувати стабільність мікроклімату без явища "перерегулювання". Техніко-економічне моделювання підтвердило, що запропонований комплекс, попри початкове зростання капітальних інвестицій на 20 %, зменшує річне енергоспоживання системи на 20 %. Це гарантує беззаперечну рентабельність проекту із строком окупності 1,5...2 роки. У макроекономічному вимірі впровадження подібних рекуперативних енергетичних систем цілком відповідає пріоритетам сталого розвитку та є критично необхідним кроком для післявоєнної розбудови промислового потенціалу України в умовах гострого енергодефіциту.

**Перспективи подальших досліджень.** У майбутньому доцільно визначити необхідність проведення тривимірного CFD-моделювання аеродинаміки всередині коаксіальних труб для пошуку оптимальної геометрії внутрішніх ребер, що дозволить зменшити аеродинамічний опір системи. Крім того, перспективним напрямком є залучення методів машинного навчання для глибинної предиктивної аналітики метеорологічних умов і динаміки навантаження підприємства, що дозволить створити повністю автоматизовану вентиляцію цеху.

### References

1. Burda, Y., Pivnenko, Y., Redko, I. "Analiz zalezhnosti vmistu naftalinu v koksovomu hazi vid temperatury i tysku". *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, no. 207, 2024 <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.301865>. (Ukrainian).
2. Savchenko, O., et al. "Suspilni priorityty pisliavoiennoi vidbudovy enerhetyky Ukrainy." *Enerhetyka ta systemy upravlinnia*, vol. 11, no. 2, 2025, pp. 115-123. <https://doi.org/10.23939/jeecs2025.02.115>. (Ukrainian).

3. Chaika, Y., Burda, Y., Pivnenko, Y., Tkachenko, R., & Redko, I. "Ventyliatsiini systemy v tsyvilnomu ta promyslovomu budivnytstvi: kompleksnyy ohliad ta shliakhy modernizatsii". *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 2025, pp. 113-122. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327331>. (Ukrainian).
4. Zhang, J., Liu, J., Deng, Z., & Liu, S. "Ventilation systems balancing rapid pollutant removal and energy efficiency in the post-pandemic era: a literature review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 225, 2026, p. 116175. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116175>.
5. Boyko, D. "Porivnialnyi analiz pozytsii Ukrainy u svitovykh reitynhakh i indeksakh v konteksti hlobalnoi paradyhmy". *Problemy zahalnoi enerhetyky*, vol. 1, 2025. [https://elibrary.kubg.edu.ua/55524/1/D\\_Boyko\\_FEU\\_2025.pdf](https://elibrary.kubg.edu.ua/55524/1/D_Boyko_FEU_2025.pdf). (Ukrainian).
6. Kovalchuk, A. M., and R. S. Melnyk. "Modernizatsiia teplovykh punktiv navchalnykh zakladiv: tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia." *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, vol. 23, 2022, pp. 28-36. (Ukrainian).
7. Sharapov S. O., Bocko J., Yevtushenko S. O., Panchenko V. O., Skydanenko M. S. "Energy-saving individual heating systems based on liquid-vapor ejector". *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(2), 2022, pp. G1-G8. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).g1](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).g1).
8. Sklabinskyi, V., and A. Karutskyi. "Identification of the influence of the rotational motion of a vibropriller basket on melt jets and droplets of mineral fertilizers in a prilling tower". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 1 (139), Feb. 2026, pp. 51-58, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.353110>.
9. Yaropud, V. "Investigation of the thermal performance of an adaptive triple-pipe heat recovery unit in livestock microclimate systems." *Vibrations in engineering and technology*, no. 3, 2025. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-3-1>.
10. Schibuola, L., Tambani, C. "Performance comparison of heat recovery systems to reduce viral contagion in indoor environments." *Applied Thermal Engineering*, vol. 190, 2021, p. 116843. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116843>.
11. Ji, Yingchun & Lomas, Kevin & Cook, Malcolm. "Hybrid ventilation for low energy building design in south China". *Building and Environment*. 44, 2009, 2245-2255. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.015>.
12. Zamytskyi, O. V., Yalova, A. M. "Research of natural ventilation in a thermally modernized building". *Municipal Economy of Cities*, vol. 3, no. 191, June 2025, pp. 314-20, <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-314-320>.
13. Zhai, Z. J., Zhang, Z., Zhang, W., & Chen, Q. Y. (2007). "Evaluation of various

- turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: part 1 – summary of prevalent turbulence models”. *HVAC&R Research*, 13(6), 853–870. <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10391459>.
14. Myroniuk, K., Furdas, Y., Zhelykh, V., Adamski, M., Gumen, O., Savin, V., & Mitoulis, S. “Passive ventilation of residential buildings using the Trombe wall”. *Buildings*, 14(10), 2024, 3154. <https://doi.org/10.3390/buildings14103154>.
  15. Ozel, Meral. "Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate." *Energy Conversion and Management*, vol. 66, 2013, pp. 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.002>.
  16. Ali, A., Issa, A., & Elshaer, A. “A comprehensive review and recent trends in thermal insulation materials for energy conservation in buildings”. *Sustainability*, 16(20), 2024, 8782. <https://doi.org/10.3390/su16208782>.
  17. Avramich, Oleksandr Vasylovych. *Teploizoliatsiinyi mat "Folhokholst"* [Heat-Insulating Mat "Folhokholst"]. Ukraine Utility Model Patent No. 89801, State Intellectual Property Service of Ukraine, 25 Apr. 2014. (Ukrainian).
  18. Alekseevsky D. G., Chernysh Ye. Yu., Shtepa V. N. “Formalization of the task of creating a mathematical model of combined wastewater treatment Processes”. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 8(2), 2021, pp. H1-H7, [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(2\).h1](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).h1).
  19. Basok, B., M. Novitska, and S. Goncharuk. “Technologies, systems, and equipment for wastewater heat utilization (review)”. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, Vol. 42, no. 3, June 2020, pp. 39-46, <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.4>.
  20. Sun, Fangtian, et al. "New medium-low temperature hydrothermal geothermal district heating system based on distributed electric compression heat pumps and a centralized absorption heat transformer." *Energy*, vol. 232, 2021, p. 120974. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120974>.
- Afram, A., & Janabi-Sharifi, F. “Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC)”. *Building and Environment*, 72, 2014, 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.016>.

UDC 628.8:681.51:725.4

Dr Hab., Prof., **Oleksandr Lapshyn**

[alexandr.lapshyn2017@knu.edu.ua](mailto:alexandr.lapshyn2017@knu.edu.ua), ORCID: 0000-0003-3586-9411

PhD student **Hanna Yaroshenko**

[yaroshenkoanna572@gmail.com](mailto:yaroshenkoanna572@gmail.com), ORCID: 0009-0009-0293-4134

*Kyryvyi Rih National University*

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.40-58>

## INTEGRATED SYSTEM FOR ADAPTIVE CONTROL OF THERMAL AND MOISTURE REGIMES IN INDUSTRIAL PREMISES BASED ON COAXIAL HEAT RECOVERY AND MULTI-LAYER INSULATION


**Abstract.** *Under the current operating conditions of industrial facilities, characterised by high-intensity heat emissions from processing equipment and fluctuating humidity levels, ensuring a stable microclimate is a critical task. Traditional general ventilation and air conditioning systems, operating in fixed modes, are often incapable of effectively compensating for dynamic fluctuations in thermal and humidity loads. This leads to the overconsumption of energy resources, disruption of technological processes, unstable air dehumidification or humidification regimes, and creates health and safety risks for personnel. The situation is further complicated by global decarbonisation requirements and the need for strict energy resource conservation amidst post-war infrastructure reconstruction, which necessitates the implementation of innovative circular solutions. This study proposes a comprehensive engineering solution, which consists of the development and implementation of an automated heat and humidity control system. The proposed system is based on the integration of coaxial ventilation ducts with an adaptive heat recovery function and an innovative multi-layered thermal insulation mat. Particular attention is paid to the development of a hybrid control strategy that combines local proportional-integral-derivative control loops with top-level predictive control algorithms, which utilise data from an extensive sensor network. This network records temperature, relative humidity, carbon dioxide concentration, and aerodynamic pressure drop. Mathematical simulation and techno-economic analysis have demonstrated that the implementation of the combined approach allows for a reduction in the system's energy consumption by 20–30 % compared to traditional analogues. The use of the thermal insulation mat ensures heat absorption efficiency at the level of 75–80 %, minimising unproductive energy losses. It has been proven that controlled heat recovery acts not only as an energy-efficient tool but also as an effective mechanism for stabilising the parameters of supply air under fluctuating outdoor weather conditions.*

**Keywords:** *industrial ventilation, heat recovery, coaxial air duct, multi-layered thermal insulation, sensor network, adaptive control, energy efficiency, microclimate.*

Received/Надійшла до редакції 01.05.2026

Accepted/Прийнято 21.05.2026

Issued/Опубліковано 29.05.2026

 Distributed under the license / Розповсюджується за ліцензією:

[Creative Commons Attribution 4.0 International License](#)