

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ

*Н. О. Притула, кандидат технічних наук, доцент*

*О. М. Бежик, аспірант*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

*E-mail: [prytula.natalia@lil.kpi.ua](mailto:prytula.natalia@lil.kpi.ua)*

**Анотація.** У статті проаналізовано різні можливості утилізації теплоти, що відводиться від встановленого обладнання на промислових підприємствах. Виконано порівняння різних типів системи, показано їх недоліки та переваги. Виконані розрахунки з використанням  $h-d$  діаграми для різних температур зовнішнього повітря для трьох варіантів схемного рішення: прямоточна система (без утилізації теплоти), система з рециркуляцією повітря та система з дворівневою камерою змішування. Показано переваги застосування адаптивної системи з дворівневою камерою змішування в порівнянні з традиційною схемою з рециркуляцією повітря. Показано, що адаптивна система для деяких режимів дозволяє зменшити експлуатаційні витрати більш ніж в 10 разів. Обговорюються технічні перешкоди на шляху до впровадження адаптивної системи з дворівневою камерою змішування.

**Ключові слова:** енергоефективність; адаптивна система; рециркуляція повітря; утилізація теплоти

**Актуальність.** Одним із ключових викликів для сучасної промисловості є необхідність забезпечення стабільних параметрів мікроклімату в умовах зростання вартості енергоносіїв та загострення енергетичних викликів. Системи вентиляції та кондиціонування повітря, що забезпечують санітарно-гігієнічні та технологічно обумовлені вимоги у виробничих приміщеннях, є одними з найбільших споживачів енергії на підприємствах. За оцінками фахівців, енерговитрати на вентиляцію та повітрообмін можуть сягати 30–50 % загального енергоспоживання підприємств харчової галузі [1, 2, 3].

Особливості технологічного обладнання в харчовій промисловості – термообробка, сушка, охолодження, пастеризація, стерилізація – зумовлюють утворення значної кількості надлишкової теплоти, яка у більшості випадків втрачається разом із витяжним повітрям. Це, своєю чергою, потребує додаткових витрат енергії на нагрівання припливного повітря, особливо у зимовий період. Водночас сучасна практика показує, що впровадження систем утилізації теплоти дозволяє скоротити енерговитрати на вентиляцію на 20–40 %, знизити загальні витрати на опалення і забезпечити сталу роботу підприємства [3, 4, 5].

Серед ключових технічних рішень, що застосовуються в світовій практиці, можна виокремити: системи теплообміну повітря-повітря (рекуператори), теплові насоси, утилізацію теплоти холодильного обладнання [4, 6], відбір теплоти з технологічних стічних вод [7], а також адаптивне регулювання вентиляції із застосуванням інтелектуальних алгоритмів [8, 9].

Однак, незважаючи на наявність рішень, рівень їх впровадження на вітчизняних підприємствах залишається низьким. Основними причинами є: висока вартість модернізації вентиляційних систем, відсутність стандартизованих підходів до оцінки енергоефективності таких заходів, а також недостатнє урахування потенціалу надлишкової теплоти в системному плануванні енергозбереження.

Крім того, важливим контекстом для впровадження сучасних рішень у сфері вентиляції є нормативні вимоги, що регулюють параметри мікроклімату та якості повітря у виробничих приміщеннях. У цьому контексті доцільно враховувати вимоги стандартів ДСТУ 9190:2022 [10] та ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019 [11], які визначають базові критерії проектування та експлуатації систем вентиляції в промисловості. Таким чином, тема використання теплоти технологічного обладнання для підвищення енергетичної ефективності вентиляційних систем є надзвичайно актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В умовах зростання енергетичних витрат і посилення екологічних обмежень особливого значення набуває повторне використання теплоти, що вивільняється у виробничих процесах, як вторинного енергетичного ресурсу. У харчовій промисловості, де технологічне обладнання

генерує значні теплові потоки (в результаті охолодження, термічної обробки, сушіння, пастеризації тощо), ця теплота часто безповоротно втрачається разом із витяжним повітрям або технологічними стоками. Впровадження рішень, спрямованих на її утилізацію, дозволяє суттєво підвищити загальну енергоефективність підприємства без втручання в основні технологічні процеси [3, 4, 5].

Один із традиційних підходів – застосування повітряних теплообмінників (рекуператорів), які дозволяють передавати теплоту від витяжного повітря до припливного. Найпоширенішими є пластинчасті та роторні теплообмінники, які демонструють коефіцієнт утилізації теплоти на рівні 50–75 % [2]. Проте ефективність їх роботи значною мірою залежить від чистоти повітря, температурного діапазону та стабільності режимів роботи. У реальних умовах харчових виробництв, де повітря часто містить водяну пару, жир чи пил, ефективність теплообміну знижується через забруднення поверхонь теплообмінника, а отже – зростає потреба в обслуговуванні та зменшується термін експлуатації [2, 12].

Більш гнучким рішенням є використання теплових насосів, що дозволяють не лише утилізувати теплоту витяжного повітря, але й підвищувати її температуру до рівня, придатного для подальшого використання. За даними Aljashaami et al. [13], сучасні теплові насоси можуть демонструвати коефіцієнт перетворення COP на рівні 3–5, залежно від типу робочого середовища та режиму роботи. Їх впровадження особливо доцільне для великих підприємств, які мають постійні теплові навантаження та потреби в технологічному теплі. Водночас бар'єрами залишаються високі початкові інвестиції, складність інтеграції у вже наявні системи вентиляції та потреба у кваліфікованому обслуговуванні.

Суттєвий потенціал має також утилізація теплоти холодильного обладнання. Як зазначають Nadžiahmetović та ін. [4], встановлення додаткових теплообмінників у холодильних системах дозволяє ефективно використовувати теплоту холодоагенту, що вивільняється під час його конденсації. У результаті можна забезпечити підігрівання води для технологічних або санітарно-побутових потреб, що в річному

розрахунку дає змогу суттєво скоротити витрати палива. Подібні рішення вже активно застосовуються на молокозаводах, у цехах заморожування та фасування харчової продукції.

Окремий напрям утилізації – використання теплоти з технологічних стічних вод. Luo et al. [7] запропонували концепцію багатоступеневої системи відбору теплоти з харчових стоків з урахуванням змін температурного режиму в часі. Автори доводять, що ефективність системи значною мірою залежить від розміщення теплообмінників, автоматизованого регулювання температури та наявності акумулювальних ємностей. Дослідження демонструє доцільність таких рішень для підприємств із великим обсягом гарячих стічних вод, як-от консервні заводи або м'ясокомбінати.

Разом із цим, сучасні дослідження все частіше акцентують увагу на використанні адаптивних вентиляційних систем, які не лише утилізують теплоту, а й автоматично регулюють обсяг повітрообміну залежно від навантаження, забруднення повітря, температури, вологості тощо. У роботі Vasile et al. [9] було показано, що використання адаптивного керування вентиляцією на основі концентрації CO<sub>2</sub> і температурного навантаження дозволяє скоротити споживання енергії майже на 73 % порівняно з традиційними фіксованими схемами. Такі системи забезпечують високий рівень комфорту та якості повітря, особливо в приміщеннях з непостійною присутністю людей чи змінними технологічними режимами.

Подібні висновки отримані й у дослідженні Kim et al. [14], де було вивчено ефективність часткової рециркуляції повітря у приміщеннях для тварин. Було виявлено, що за рахунок динамічного регулювання співвідношення свіжого і рециркуляційного повітря можна досягти скорочення енерговитрат на 40–50 % без погіршення параметрів мікроклімату. Хоча дослідження проводилося не в харчовій промисловості, його висновки є релевантними для аналізу схожих умов у цехах фасування, пакування чи бродіння продукції.

Окрім того, як свідчать експериментальні дані, наведені в дослідженні Adam et al. [15], навіть базова оптимізація параметрів роботи вентиляційних систем дозволяє

досягати зниження енергоспоживання на рівні до 15 %, що підтверджує доцільність впровадження рішень адаптивного типу у виробничих умовах.

Досвід впровадження інтегрованих систем також активно вивчається у суміжних галузях. Зокрема, Li et al. [6] досліджували енергоефективні рішення для агропромислових об'єктів у холодних регіонах. Вони виявили, що комбінація геотермальних теплових насосів, сонячних панелей, LED-освітлення та адаптивної вентиляції дозволяє досягати до 18 % річної економії енергії. Хоча ці рішення реалізовані у теплицях, їх принципи можуть бути адаптовані й до умов харчових підприємств, де важливе значення має контроль клімату.

На завершення слід відзначити системні дослідження Clairand et al. [3], які узагальнили бар'єри та можливості впровадження енергоефективних технологій у харчовій промисловості. Автори визначили ключові обмеження, такі як нестача фінансових ресурсів, обмежений доступ до технологій, відсутність стимулів з боку держави, а також складність інтеграції рішень у наявну інфраструктуру. При цьому саме системне планування, поєднання кількох технологій та підтримка на рівні енергетичної політики визнані критичними для успішного впровадження заходів з енергозбереження.

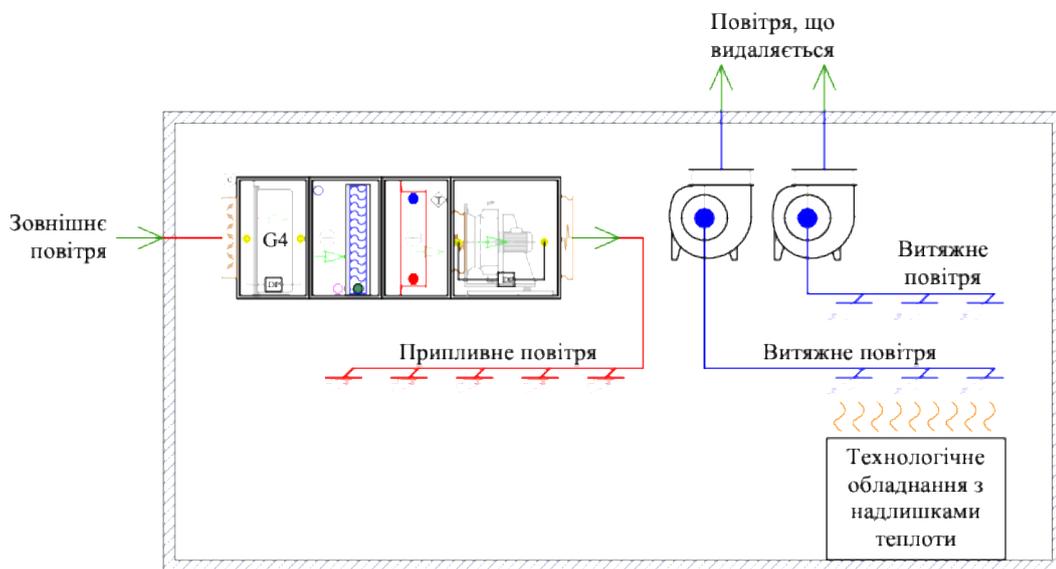
Таким чином, аналіз сучасних підходів до утилізації надлишкової теплоти у вентиляційних системах демонструє широку палітру можливостей – від локальних технічних рішень до комплексних інтегрованих систем. Їх ефективність залежить не лише від вибору конкретної технології, а й від глибини її адаптації до умов конкретного підприємства. Для харчової промисловості особливо актуальними є поєднання рішень, що базуються на адаптивному управлінні повітрообміном, рециркуляції та відборі теплоти з технологічних джерел.

**Метою дослідження** є аналіз сучасних підходів до утилізації надлишкової теплоти, порівняння ефективності різних вентиляційних схем та обґрунтування перспективності впровадження адаптивних систем із рециркуляцією повітря для умов харчової промисловості.

**Матеріали та методи дослідження.** У виробничих приміщеннях харчової промисловості вентиляція виконує не лише санітарно-гігієнічну, а й теплотехнічну

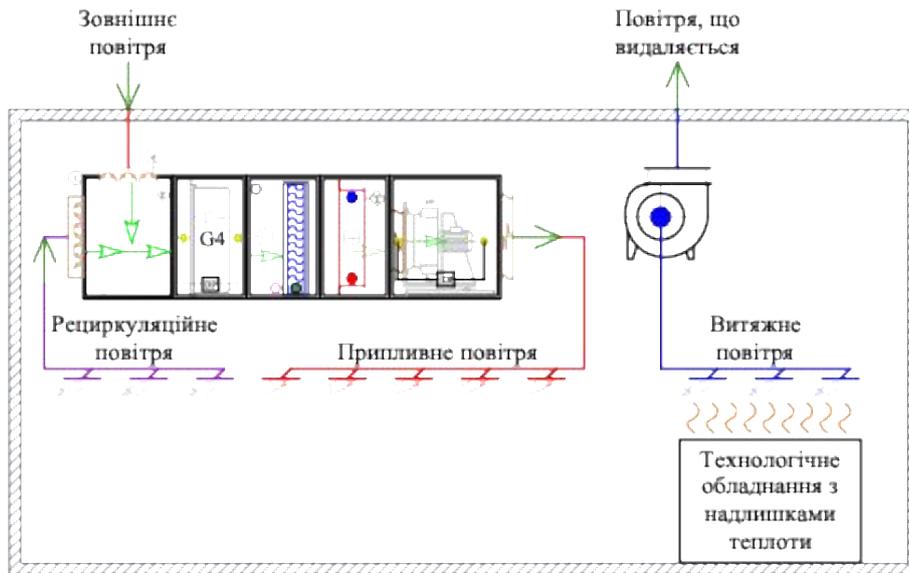
функцію, оскільки слугує основним каналом для відведення теплоти, яка утворюється в результаті роботи обладнання. Залежно від технічного рівня підприємства та прийнятих рішень щодо енергозбереження, на практиці реалізуються кілька схем організації вентиляційного повітрообміну. Найпоширенішими є такі три варіанти:

1. Прямоточна (традиційна) схема – передбачає повне видалення теплого відпрацьованого повітря назовні без його повторного використання. Вона є технічно простою, проте характеризується високими втратами теплоти та значними витратами на підігрівання припливного повітря.



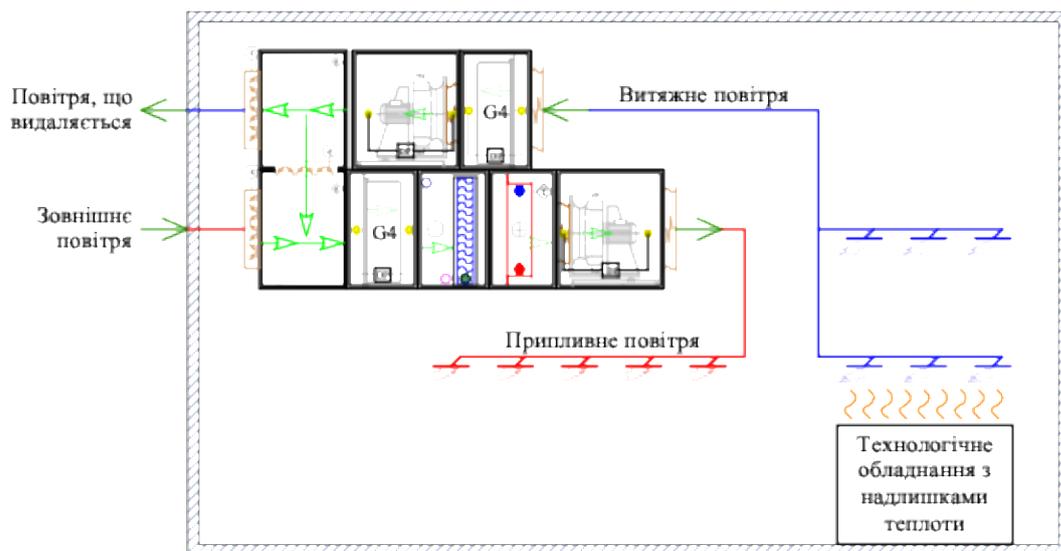
**Рис. 1. Прямоточна (традиційна) вентиляційна схема**

2. Схема з рециркуляцією повітря – дозволяє частково повертати тепле витяжне повітря до припливної системи шляхом його змішування зі свіжим повітрям у фіксованому співвідношенні. Ця схема забезпечує певний рівень енергозбереження, але має обмеження у гнучкості адаптації до змінних умов.



**Рис.2. Схема з рециркуляцією повітря**

3. Схема з дворівневою (адаптивною) камерою змішування – передбачає наявність двох послідовно розташованих зон змішування, що дає змогу адаптивно регулювати співвідношення між свіжим та рециркуляційним повітрям. Такий підхід дозволяє максимально ефективно використовувати наявну теплоту від технолігічного обладнання залежно від зовнішніх кліматичних умов і змінності технолігічного процесу.



**Рис. 3. Схема з дворівневою (адаптивною) камерою змішування**

Порівняльні характеристики трьох типів систем подано у табл. 1.

## 1. Порівняння різних типів систем

Параметр	Прямоточна (традиційна) схема	Схема з рециркуляцією повітря	Схема з дворівневою (адаптивною) камерою змішування
Енергетичні втрати	Високі	Середні	Низькі
Гнучкість регулювання параметрів мікроклімату приміщення	Не має	Обмежена	Висока
Технічна складність	Низька	Середня	Висока
Потенціал енергоефективності	Низький	Помірний	Високий
Вартість впровадження	Мінімальна	Середня	Вище, з перспективою окупності

Тобто кожна з трьох схем має свої переваги та обмеження. Найбільш перспективною в умовах сучасних енергоекономічних викликів є адаптивна система з дворівневою камерою змішування, яка забезпечує найвищий потенціал утилізації надлишкової теплоти та дозволяє оптимізувати повітрообмін під конкретні умови виробничого середовища.

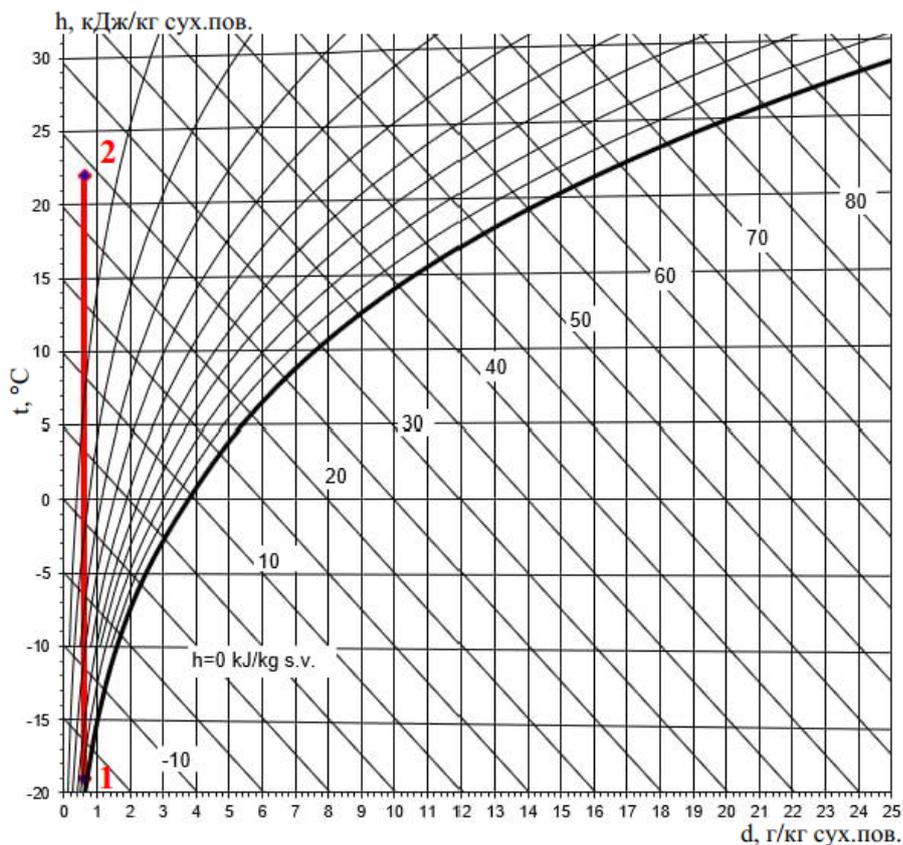
**Результати досліджень та їх обговорення.** Для порівняння ефективності наведених схем вентиляції було виконано порівняння з використанням h-d діаграми, яка дозволяє оцінити різницю у витратах енергії на догрів припливного повітря за різних схем утилізації теплоти.

Вихідні дані, прийняті для порівняльного аналізу:

- Розрахункові витрати повітря:
  - об'єм припливного повітря для забезпечення необхідного повітрообміну – 20000 м<sup>3</sup>/год;
  - об'єм повітря, що видаляється від технологічного обладнання – 1500 м<sup>3</sup>/год.
  - мінімальний об'єм свіжого повітря – 1500 м<sup>3</sup>/год.
- Параметри припливного повітря для холодного періоду року:
  - температура – плюс 22°C;
  - вологість не нормується.
- Параметри зовнішнього повітря для холодного періоду року:
  - температура – мінус 19°C;

- вологість – 90%.
- Параметри повітря, що видаляється від технологічного обладнання:
  - температура – плюс 50 °С;
  - вологість – 30 %.
- Параметри повітря, що видаляється з приміщення:
  - температура – плюс 20 °С;
  - вологість – 30 %.

На основі зазначених вихідних даних було проведено порівняння традиційної (рис. 4), однорівневої (рис. 5) та адаптивної (рис. 6) вентиляційних схем з використанням h-d діаграми. Попередні розрахунки демонструють, що адаптивна схема дозволяє суттєво знизити енергоспоживання порівняно з іншими схемами завдяки максимальному використанню теплоти технологічного обладнання.



**Рис.4. h-d діаграма припливної установки без камери змішування**

## 2. Результати розрахунків для прямоточної (традиційної) схеми

Параметр повітря	Одиниця вимірювання	Зовнішнє повітря		Припливне повітря (нагрів)
		1	2	2
Температура	°С	-19,0		22,0
Вологість	%	90%		4%
Вологовміст	Г/КГ сух.пов.	0,6		0,6
Ентальпія	кДж/кг сух.пов.	-17,6		23,8
Густина	кг/м <sup>3</sup>	1,39		1,20
Витрата	м <sup>3</sup> /год	20 000		20 000
Потужність	кВт			276,4

Загальна розрахункова теплова потужність за цим варіантом складе 276,4 кВт.

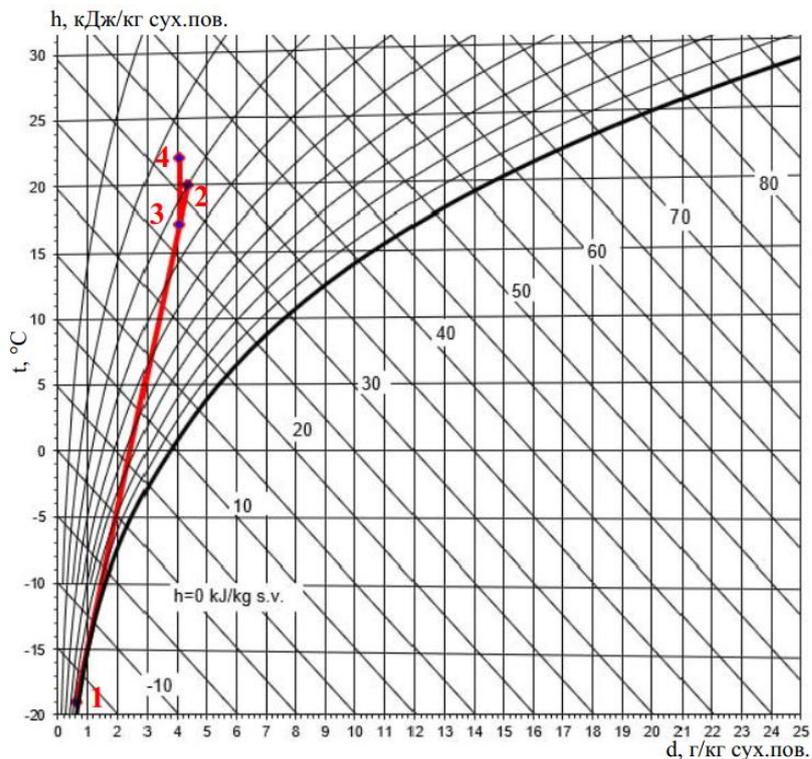
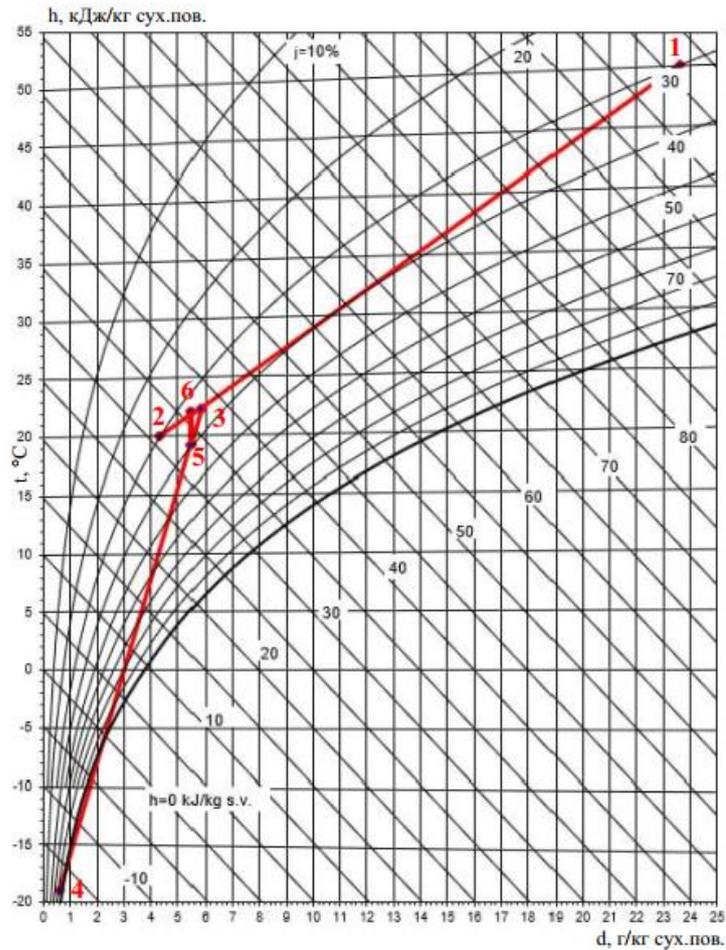


Рис.5. h-d діаграма припливної установки з камерою змішування

## 3. Результати розрахунків для схеми з рециркуляцією повітря

Параметр повітря	Одиниця вимірювання	Зовнішнє повітря	Повітря, що видаляється з приміщення	Змішування повітря	Припливне повітря (нагрів)
		1	2	3	4
Температура	°С	-19,0	20,0	17,1	22,0
Вологість	%	90%	30%	34%	25%
Вологовміст	Г/КГ сух.пов.	0,6	4,3	4,1	4,1
Ентальпія	кДж/кг сух.пов.	-17,6	31,2	27,5	31,4
Густина	кг/м <sup>3</sup>	1,39	1,20	1,23	1,19
Витрата	м <sup>3</sup> /год	1 500	18 500	20 000	20 000
Потужність	кВт				33,3

Загальна розрахункова теплова потужність за цим варіантом складе 33,3 кВт.



**Рис. 6. h-d діаграма припливної установки з дворівневою (адаптивною) камерою змішування**

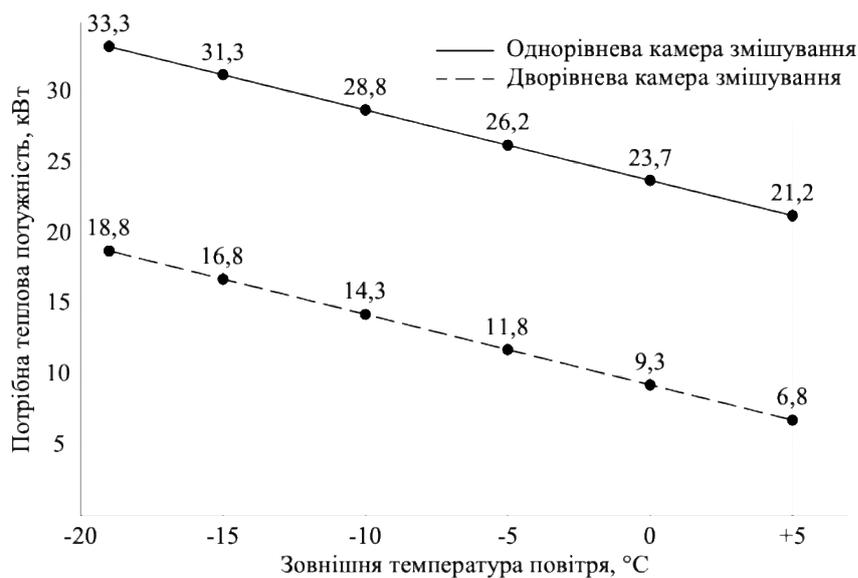
Таким чином, результати попередніх розрахунків підтверджують високу енергоефективність системи з дворівневою камерою змішування. В умовах однакових внутрішніх параметрів та зовнішньої температури мінус 19°C, теплова потужність, необхідна для догріву припливного повітря, становить лише 18,8 кВт для адаптивної системи, тоді як для прямої – понад 276,4 кВт. Це майже у 15 разів менше. Подібна різниця дає підстави стверджувати, що традиційна схема вентиляції в сучасних умовах є технічно застарілою та не повинна розглядатися як раціональна альтернатива, за винятком випадків обмеженого бюджету на модернізацію. Надалі доцільно зосереджуватись на порівнянні та вдосконаленні саме адаптивних рішень з використанням камер змішування.

На рис. 7. наведено порівняння теплового навантаження двох різних систем з камерою змішування за різних зовнішніх температур для даних вихідних даних.

4. Результати розрахунків для схеми з дворівневою (адаптивною) камерою змішування

Параметр повітря	Одиниця вимірювання	Повітря, що видаляється від технологічного обладнання	Повітря, що видаляється з приміщення	Змішування витяжного повітря	
		1	2	3	
Температура	°С	50,0	20,0	22,3	
Вологість	%	30%	30%	35%	
Вологовміст	г/кг сух.пов.	23,6	4,3	5,8	
Ентальпія	кДж/кг сух.пов.	111,7	31,2	37,4	
Густина	кг/м <sup>3</sup>	1,08	1,20	1,23	
Витрата	м <sup>3</sup> /год	1 500	18 500	20 000	
Параметр повітря	Одиниця вимірювання	Витяжне повітря	Зовнішнє повітря	Змішування повітря	Припливне повітря (нагрів)
		3	4	5	6
Температура	°С	22,3	-19,0	19,2	22,0
Вологість	%	35%	90%	39%	33%
Вологовміст	г/кг сух.пов.	5,8	0,6	5,5	5,5
Ентальпія	кДж/кг сух.пов.	37,4	-17,6	33,3	36,1
Густина	кг/м <sup>3</sup>	1,23	1,39	1,20	1,19
Витрата	м <sup>3</sup> /год	18 500	1 500	20 000	20 000
Потужність	кВт				18,8

Загальна розрахункова теплова потужність за цим варіантом складе 18,8 кВт.



**Рис.7. Порівняння теплового навантаження систем при різних зовнішніх температурах**

Як видно з графіку, при зниженні температури ефективність адаптивної системи зберігається на значно вищому рівні, демонструючи більш ніж 30 % перевагу в енергозбереженні на всьому діапазоні температур.

Отримані теоретичні результати підтверджують перспективність використання адаптивної вентиляційної системи з дворівневою камерою змішування, яка дозволяє суттєво скоротити теплові навантаження та відповідні енерговитрати. У подальшому робота буде орієнтована на перевірку ефективності цієї системи в реальних умовах експлуатації.

Нині триває підготовка до проведення експериментального моделювання системи з дворівневою камерою змішування на базі існуючої вентиляційної установки одного з харчових підприємств. Планується встановлення системи автоматизованого керування, що дозволить адаптивно змінювати співвідношення між припливним і рециркуляційним повітрям залежно від параметрів внутрішнього мікроклімату та зовнішніх погодних умов. Очікується, що під час експлуатації система продемонструє узгодженість з попередніми розрахунками, а також виявить додаткові фактори, що впливають на ефективність роботи у виробничих умовах.

### **Висновки і перспективи.**

Раціональне використання вторинних енергетичних ресурсів, зокрема теплоти, що утворюється внаслідок роботи технологічного обладнання, є одним з ефективних способів зниження енерговитрат у системах вентиляції на харчових підприємствах. Аналіз літературних джерел і технічних рішень показав, що теплота, яка раніше вважалася втратами, може бути адаптивно використана для попереднього підігрівання припливного повітря.

Проведене порівняння трьох варіантів вентиляційних рішень (традиційної схеми, однорівневої та дворівневої камери змішування) підтвердило доцільність впровадження систем з рециркуляцією повітря. Особливо ефективним виявився варіант із дворівневою камерою змішування, який дозволяє адаптивно регулювати співвідношення потоків та максимально використовувати теплоту повітря, нагрітого в процесі роботи обладнання.

Побудована залежність необхідної теплової потужності від зовнішньої температури показала стабільну перевагу дворівневої схеми в усьому діапазоні температур. Отримані дані підтверджують, що системи з рециркуляцією повітря здатні не лише зменшувати витрати, але й забезпечувати стабільні умови мікроклімату в умовах змінного зовнішнього середовища та технологічного процесу.

На основі проведеного аналізу можна стверджувати, що в умовах сучасних енергетичних викликів традиційна схема вентиляції не повинна розглядатись як раціональна альтернатива. Принаймні два варіанти із рециркуляцією є значно ефективнішими – як з енергетичної, так і з економічної точки зору.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на моделювання та експериментальну перевірку ефективності систем із дворівневою камерою змішування на реальних об'єктах. Це дозволить врахувати вплив динаміки навантажень, особливостей графіків роботи підприємства, реальних втрат і швидкості реакції автоматичних систем.

### **Список використаних джерел**

1. Clairand J.-M. et al. Review of Energy Efficiency Technologies in the Food Industry: Trends, Barriers, and Opportunities. Energy Reports. 2020.
2. Hadžiahmetović Z. et al. Solution Proposal for Utilization of the Waste Heat in Refrigeration Systems. TEM Journal. 2021. Vol. 10(1), pp. 177–182.
3. Lundberg M., Christenson M. Waste Heat Recovery in the Food and Drink Industry. – Carbon Trust Case Study (UK Heinz factory).
4. Goodfellow H.D., Kosonen R. Industrial Ventilation Design Guidebook: Updated Edition. Academic Press, 2020.
5. Li Y. et al. Energy Saving Technologies and Practices in Facility Agriculture in Cold Regions. Agronomy. 2024. Vol. 15(1): 204.
6. Luo X. et al. A Framework for Recovering Waste Heat Energy from Food Processing Effluent. Water. 2023. Vol. 15(1):12.
7. Kong D. et al. A parametric, control-integrated and machine learning-enhanced modeling method of demand-side HVAC systems in industrial buildings. Applied Energy. 2024. Vol. 379.
8. Vasile V. et al. The Effects of an Adaptive Ventilation Control System on Indoor Air Quality and Energy Consumption. Sustainability. 2024. Vol. 16(22):9836.
9. ДСТУ 9190:2022. Вентиляція та кондиціонування повітря. Норми проектування. Київ, 2022.

10. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE, 2019.
11. Aljashaami B.A. et al. Recent improvements to heating, ventilation, and cooling technologies based on renewable energy to achieve zero-energy buildings. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 21.
12. Adam M. et al. Experimental measurements and analysis of parameters that influence the consumption of electrical energy in HVAC systems. *Romanian Journal of Civil Engineering*. 2024.
13. Goullis G., Kovacic I. A study on building performance analysis for energy retrofit of existing industrial facilities. *Applied Energy*. 2016.
14. Kim J. et al. Development and validation of an air recirculated ventilation system, Part 2: Evaluation of pig productivity. *Biosystems Engineering*. 2023.
15. International Energy Agency (IEA). *Energy Efficiency 2024*. Paris: IEA, 2024.
16. IRENA, OECD/IEA, REN21. *Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling*. 2020.
17. Goodfellow H.D., Tahti E. *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Academic Press, 2001.

### **References**

1. Clairand, J.-M. et al. (2020). Review of Energy Efficiency Technologies in the Food Industry: Trends, Barriers, and Opportunities. *Energy Reports*.
2. Hadžiahmetović, Z. et al. (2021). Solution Proposal for Utilization of the Waste Heat in Refrigeration Systems. *TEM Journal*, 10(1), 177–182.
3. Lundberg, M., Christenson, M. Waste Heat Recovery in the Food and Drink Industry. *Carbon Trust Case Study (UK Heinz factory)*.
4. Goodfellow, H.D., Kosonen, R. (2020). *Industrial Ventilation Design Guidebook: Updated Edition*. Academic Press.
5. Li, Y. et al. (2024). Energy Saving Technologies and Practices in Facility Agriculture in Cold Regions. *Agronomy*, 15(1), 204.
6. Luo, X. et al. (2023). Framework for Recovering Waste Heat Energy from Food Processing Effluent. *Water*, 15(1), 12.
7. Kong, D. et al. (2024). A parametric, control-integrated and machine learning-enhanced modeling method of demand-side HVAC systems in industrial buildings. *Applied Energy*, 379.
8. Vasile, V. et al. (2024). The Effects of an Adaptive Ventilation Control System on Indoor Air Quality and Energy Consumption. *Sustainability*, Vol. 16(22), 9836.
9. DSTU 9190:2022. *Ventylatsiia ta kondytsionuvannia povitria. Normy proiektuvannia [Ventilation and Air Conditioning]. Design Standards*. Kyiv, 2022.
10. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE, 2019.
11. Aljashaami, B.A. et al. (2024). Recent improvements to heating, ventilation, and cooling technologies based on renewable energy to achieve zero-energy buildings. *Results in Engineering*, 21.

12. Adam, M. et al. (2024). Experimental measurements and analysis of parameters that influence the consumption of electrical energy in HVAC systems. Romanian Journal of Civil Engineering.
13. Gourelis, G., Kovacicm I. (2016). A study on building performance analysis for energy retrofit of existing industrial facilities. Applied Energy.
14. Kim, J. et al. (2024). Development and validation of an air recirculated ventilation system, Part 2: Evaluation of pig productivity. Biosystems Engineering.
15. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2024. Paris: IEA.
16. IRENA, OECD/IEA, REN21. (2020). Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling.
17. Goodfellow, H.D., Tahti, E. (2001). Industrial Ventilation Design Guidebook. Academic Press.

## **UTILIZATION OF WASTE HEAT FROM TECHNOLOGICAL EQUIPMENT TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF VENTILATION SYSTEMS**

*N. Prytula, O. Bezhyk*

**Abstract.** *The article analyzes various possibilities for utilizing waste heat removed from installed equipment at industrial enterprises. A comparison of different types of systems is presented, highlighting their advantages and disadvantages. Calculations using the h–d diagram were carried out for different outdoor air temperatures for three system configurations: a straight-through system (without heat recovery), a system with air recirculation, and a system with a two-level mixing chamber. The advantages of using an adaptive system with a two-level mixing chamber compared to the traditional air recirculation scheme are demonstrated. It is shown that, under certain operating modes, the adaptive system can reduce operational costs by more than 10 times. Technical barriers to the implementation of an adaptive system with a two-level mixing chamber are also discussed.*

**Key words:** *energy efficiency; adaptive system; air recirculation; heat recovery*