

**Яропуд В. М.**

д.т.н., доцент

Штуць А. А.

к.т.н., доцент

Колісник М. А.

д.ф., ст. викладач

Липницький Р. М.

асистент

**Вінницький національний
аграрний університет****Yaropud V.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Shtuts A.**Candidate of Technical Sciences
Associate Professor**Kolisnyk M.**

PhD, Senior Lecturer

Lypnytskiy R.

assistant

**Vinnitsia National
Agrarian University.**

АНАЛІЗ ТЕПЛООБМІННИКІВ ПОБІЧНО-ВИПАРНОГО ТИПУ В КОГЕНЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВДЕ © 2026 by Яропуд В. М., Штуць А. А., Колісник М. А., Липницький Р. М. is licensed under CC BY 4.0

УДК 621.182:621.311.24:697.329**DOI: 10.37128/2306-8744-2026-1-6**

АНАЛІЗ ТЕПЛООБМІННИКІВ ПОБІЧНО-ВИПАРНОГО ТИПУ В КОГЕНЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВДЕ

У статті виконано комплексний аналітичний огляд теплообмінників побічно-випарного типу (Indirect Evaporative Coolers, IEC) як перспективного елемента підвищення енергоефективності когенераційних систем на основі відновлюваних джерел енергії. дослідження зумовлена необхідністю раціонального використання низькопотенційних теплових потоків, характерних для біогазових, біомасових і гібридних енергетичних установок, а також зниження питомих витрат енергії на охолодження в умовах зростання частки ВДЕ в енергобалансі.

Розглянуто передумови та основні напрями застосування теплообмінників побічно-випарного типу для охолодження повітря, що подається в двигуни внутрішнього згоряння на біогазі, газотурбінні та мікротурбінні установки, а також для утилізації низькопотенційного скидного тепла. Проаналізовано фізичні основи роботи IEC, які базуються на непрямому тепло- та масообміні з використанням прихованої теплоти випаровування води, що забезпечує інтенсифікацію теплопередачі за умов обмежених температурних напорів.

У роботі систематизовано основні конструктивні рішення теплообмінників побічно-випарного типу, зокрема пластинчасті, каналні та трубчасті схеми, а також сучасні методи інтенсифікації тепломасообміну із застосуванням капілярно-пористих матеріалів, оребрених поверхонь, полімерних і композитних теплообмінних елементів. Наведено порівняльну оцінку промислових рішень провідних світових виробників за критеріями теплотехнічної ефективності, експлуатаційної надійності та економічної доцільності впровадження.

Показано, що найбільший ефект від застосування теплообмінників побічно-випарного типу досягається в когенераційних системах на основі біогазу за рахунок охолодження впускного повітря, що сприяє підвищенню електричної ефективності, стабілізації теплових режимів та зниженню власного енергоспоживання. Сформульовано практичні рекомендації щодо вибору типу IEC для підприємств агропромислового комплексу з урахуванням кліматичних умов експлуатації, якості води, вимог до ресурсу обладнання та обмежень за капітальними витратами.

Ключові слова: побічно-випарне охолодження, теплообмінник, когенерація, біогаз, біомаса, відновлювані джерела енергії, АПК, утилізація низькопотенційного тепла, енергоефективність.



Вступ. У сучасних умовах розвитку світової енергетики спостерігається стійка тенденція до зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в структурі енергобалансів як окремих країн, так і глобальної енергосистеми в цілому. Це зумовлено необхідністю зменшення викидів парникових газів, підвищення енергетичної безпеки, зниження залежності від викопних палив та забезпечення сталого розвитку економіки. Особливо актуальними ці питання є для агропромислового комплексу (АПК), який характеризується значним енергоспоживанням, наявністю власних відновлюваних ресурсів (біомаса, біогаз, агровідходи) та підвищеними вимогами до надійності енергозабезпечення.

Одним із найбільш ефективних шляхів підвищення енергетичної ефективності систем енергозабезпечення підприємств АПК є впровадження когенераційних систем, які забезпечують одночасне виробництво електричної та теплової енергії. Когенераційні установки на основі біогазу, біомаси, сонячно-теплових та гібридних джерел дозволяють досягати значно вищих значень загального коефіцієнта корисної дії порівняно з роздільним виробництвом енергії. Водночас, навіть у таких системах суттєва частина енергії втрачається у вигляді низькопотенційного тепла, що відводиться з відпрацьованими газами, охолоджувальними контурами або вентиляційними потоками.

Наявність низькопотенційних теплових потоків є характерною особливістю когенераційних систем на основі ВДЕ, зокрема біогазових установок та двигунів внутрішнього згорання, де температура відпрацьованих середовищ часто не дозволяє ефективно використовувати традиційні теплообмінні апарати. У цьому контексті актуальною науково-технічною задачею є пошук та впровадження інноваційних теплообмінних рішень, здатних забезпечити інтенсифікацію теплопередачі за відносно малих температурних напорів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перспективним напрямом вирішення зазначеної проблеми є застосування теплообмінників побічно-випарного типу, принцип дії яких базується на використанні прихованої теплоти випаровування води. На відміну від традиційних рекуперативних теплообмінників, у таких апаратах реалізується комбінований тепломасообмінний процес, що дозволяє значно підвищити ефективність відведення або утилізації тепла без прямого контакту основних теплоносіїв із зволожувальним середовищем. Це є особливо важливим для когенераційних систем, де необхідно зберігати стабільні параметри повітря або газу, що подається до енергетичного обладнання.

Аналіз світового досвіду показує, що теплообмінники побічно-випарного типу знаходять

все ширше застосування в системах кондиціонування повітря, промислового охолодження та енергетичних установках, однак питання їх інтеграції саме в когенераційні системи на основі відновлюваних джерел енергії залишаються недостатньо дослідженими. Відсутність узагальнених підходів до вибору конструктивних рішень, оцінки теплотехнічних характеристик та умов ефективної роботи таких теплообмінників обмежує можливості їх широкого впровадження в практику енергозабезпечення підприємств АПК.

Проведення комплексного аналізу сучасних конструкцій та принципів роботи теплообмінників побічно-випарного типу в когенераційних системах на основі відновлюваних джерел енергії є актуальною науково-технічною задачею. Результати такого аналізу створюють основу для подальших теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення енергоефективності когенераційних систем та раціональне використання низькопотенційних теплових ресурсів.

Матеріали та методи дослідження.

Теплообмінники побічно-випарного типу є одним із найбільш перспективних технічних рішень для утилізації низькопотенційного тепла в когенераційних системах на основі відновлюваних джерел енергії. Їх принцип роботи базується на непрямому теплообміні між основним теплоносієм і зволоженою поверхнею, де відбувається випаровування води та відбір прихованої теплоти фазового переходу. Це дозволяє суттєво підвищити ефективність теплопередачі за умов обмеженого температурного напору, характерного для біогазових, біомасових та гібридних енергетичних установок.

1. Класичні непрямі випарні теплообмінники каналного типу (Munters Oasis IEC, SyCool IEC, Швеція). Теплообмінники компанії Munters (Швеція) реалізують класичний принцип непрямого випарного охолодження, при якому основний повітряний або газовий потік проходить через сухі канали, відокремлені теплообмінною стінкою від зволоженої зони. Зі сторони вологих каналів поверхня змочується водою, а допоміжний повітряний потік забезпечує її випаровування. Теплота передається через стінку та витрачається на випаровування, що дозволяє охолоджувати основний потік без зміни його вологовмісту.

Ці теплообмінники вирізняються високою промисловою надійністю, стабільною якістю виготовлення та тривалим ресурсом роботи.

Переваги: дуже висока надійність; відпрацьована технологія; стабільна робота в промислових умовах; придатність для когенераційних систем.

Недоліки: висока вартість; ефективність обмежена температурою мокрого термометра; значні капітальні витрати.



Оцінка: одні з найнадійніших, але не найдешевші.

2. Багатоканальні пластинчасті теплообмінники. (Climate Wizard, Seeley International, Австралія). Теплообмінники Climate Wizard компанії Seeley International (Австралія) працюють за принципом багатоканального непрямого випарного теплообміну. Основний потік проходить сухими каналами, тоді як у сусідніх каналах відбувається випаровування води з постійно зволоженої поверхні. Оптимізована геометрія каналів забезпечує високий коефіцієнт тепловіддачі при відносно малих аеродинамічних втратах.

Переваги: хороше співвідношення "ціна-ефективність"; компактність; низьке електроспоживання; перевірена промислова експлуатація.

Недоліки: зниження ефективності у вологому кліматі; чутливість до якості води.

Оцінка: економічно доцільні, добре підходять для АПК та середніх когенераційних систем.

3. Регенеративні теплообмінники за циклом Майсотсенка (Coolerado M30, M50, C60, США). Теплообмінники Coolerado (США) реалізують регенеративний принцип побічно-випарного теплообміну (M-cycle), при якому частина вже охолодженого повітря використовується як робочий потік для інтенсифікації випаровування. Це дозволяє знижувати температуру теплообмінної поверхні нижче температури мокрого термометра та наближатися до температури точки роси.

Переваги: найвища термодинамічна ефективність; максимальне використання випарного потенціалу; значне підвищення ККД когенераційних систем.

Недоліки: складна конструкція; висока вартість; складніше обслуговування.

Оцінка: найефективніші, але дорогі та складні для масового впровадження в АПК.

4. Полімерні пластинчасті теплообмінники (DAMA, HMX Cooling, Ізраїль) Теплообмінники HMX Cooling (Ізраїль) серії DAMA використовують полімерні теплообмінні елементи, що забезпечують високу корозійну стійкість та рівномірне змочування поверхні. Принцип роботи відповідає класичному непрямому випарному теплообміну, однак конструкція оптимізована для агресивних середовищ та промислових енергетичних систем.

Переваги: корозійна стійкість; менша маса; придатність для біогазових систем; середня вартість.

Недоліки: низька теплопровідність полімерів; потреба у збільшеній площі теплообміну.

Оцінка: оптимальний компроміс між ціною, довговічністю та ефективністю.

5. Перехресні непрямі випарні теплообмінники (STULZ, Німеччина) Теплообмінники компанії STULZ (Німеччина) працюють за схемою перехресного руху сухого та зволоженого потоків. Вони широко застосовуються в системах промислового охолодження та характеризуються модульною конструкцією і високою якістю виготовлення. Переваги: простота; компактність; німецька промислова якість; висока надійність.

Недоліки: нижча ефективність порівняно з регенеративними схемами; обмежений потенціал інтенсифікації теплообміну.

Оцінка: надійні, але не найефективніші для утилізації низькопотенційного тепла.

6. Мембранно-десикантні теплообмінники (DEVar, NREL, США). Розробки NREL (США) поєднують непрямою випарний теплообмін із процесами осушення повітря. Принцип роботи базується на одночасному тепло- та масообміні через мембранні або гігроскопічні матеріали, що дозволяє ефективно працювати у вологому кліматі.

Переваги: робота у складних кліматичних умовах; високий науковий потенціал.

Недоліки: висока складність; висока вартість; обмежена комерційна доступність.

Оцінка: перспективні, але наразі малоприменні для АПК.

Порівняльний аналіз показує, що з позицій максимальної ефективності лідером є регенеративні теплообмінники за циклом Майсотсенка (Coolerado, США). З точки зору надійності та довговічності найкращими є класичні рішення компаній Munters (Швеція) та STULZ (Німеччина). Водночас для практичного впровадження в когенераційних системах енергозабезпечення підприємств АПК найбільш економічно доцільними є теплообмінники Climate Wizard (Австралія) та HMX Cooling DAMA (Ізраїль), які забезпечують оптимальний баланс між ефективністю, вартістю та експлуатаційною надійністю.

Саме ці типи теплообмінників доцільно розглядати як базові для подальших експериментальних досліджень і розробки інтегрованих когенераційних систем на основі відновлюваних джерел енергії.

Конструктивні особливості теплообмінників побічно-випарного типу

Аналіз сучасних конструкцій теплообмінників побічно-випарного типу показує, що, незважаючи на різноманіття реалізацій, усі вони базуються на принциповому конструктивному рішенні - розділенні сухого та зволоженого потоків теплоносіїв із забезпеченням непрямого тепломасообміну. Основними конструктивними схемами, які отримали найбільше поширення в промислових та експериментальних установках, є

пластинчасті, каналні та трубчасті теплообмінники, що підтверджується аналізом конструкцій провідних світових виробників і наукових розробок.

Пластинчасті теплообмінники побічно-випарного типу. Пластинчасті теплообмінники є найбільш поширеним конструктивним виконанням у сучасних системах непрямого випарного охолодження. У таких апаратах теплообмін здійснюється через

систему паралельних тонкостінних пластин, які формують чергування сухих і зволжених каналів. Основний повітряний або газовий потік рухається сухими каналами, тоді як з протилежного боку пластин розташовані зволожені канали, поверхня яких змочується водою та продувається допоміжним повітряним потоком. Принципова конструктивна схема пластинчастого теплообмінника побічно-випарного типу наведена на рис. 1

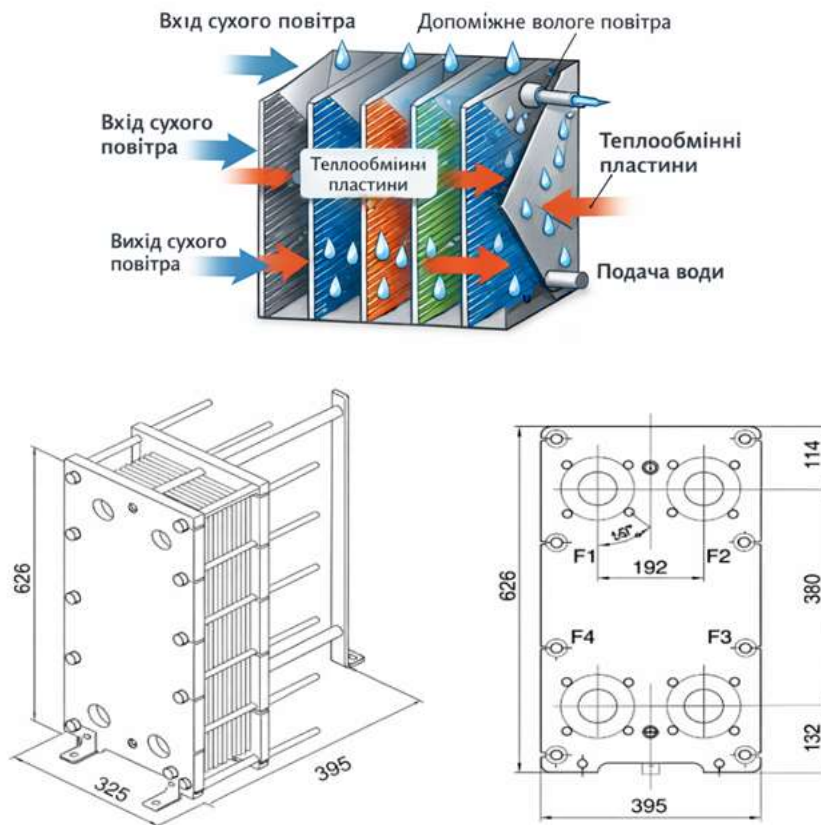


Рис. 1. Конструктивна схема пластинчастого теплообмінника побічно-випарного типу (сухі канали, зволожені канали, теплообмінні пластини, подача води, напрямки повітряних потоків)

перевагою пластинчастих конструкцій є велика питома площа теплообміну, компактність та можливість масштабування. Для підвищення ефективності теплообміну в таких теплообмінниках широко застосовуються гофровані або мікропрофільовані пластини, які інтенсифікують турбулентність потоку. Недоліком є підвищена чутливість до забруднення каналів та вимоги до якості води.

Канальні теплообмінники з розділенням сухих і зволжених зон. Канальні теплообмінники побічно-випарного

типу конструктивно виконуються у вигляді системи каналів прямокутного або складного профілю, які формують окремі сухі та зволожені зони. Такі конструкції характерні для класичних каналних ІЕС теплообмінників і регенеративних систем. Основний потік рухається сухими каналами, а зволоження реалізується на поверхнях суміжних каналів, що забезпечує інтенсивний тепломасообмін уздовж усього теплообмінного блоку. Типова канална схема наведена на рис. 2.

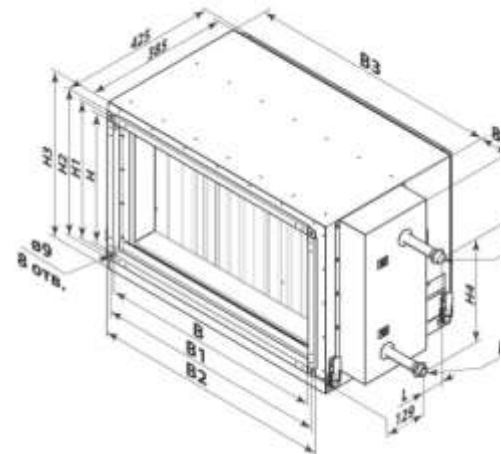
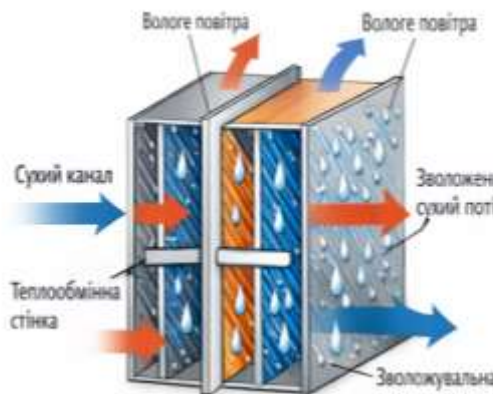


Рис. 2. Канальна конструкція теплообмінника побічно-випарного типу (окремі dry- та wet-канали, теплообмінна стінка, зволожувальна система)

Канальні теплообмінники відзначаються конструктивною простотою та можливістю реалізації різних схем руху потоків (прямотечія, перехресна течія, регенеративні схеми). Разом з тим ефективність таких теплообмінників значною мірою залежить від рівномірності розподілу повітря та води по каналах.

Трубчасті теплообмінники побічно-випарного типу. Трубчасті теплообмінники застосовуються переважно в системах, де висуваються підвищені вимоги до механічної

міцності та надійності. У таких апаратах основний теплоносій рухається всередині труб, тоді як з зовнішньої поверхні труб реалізується зволоження та випаровування води. Допоміжний повітряний потік забезпечує інтенсивне випаровування з поверхні труб, що призводить до охолодження стінки та відбору теплоти від основного потоку. Принципова схема трубчастого теплообмінника наведена на рис. 3

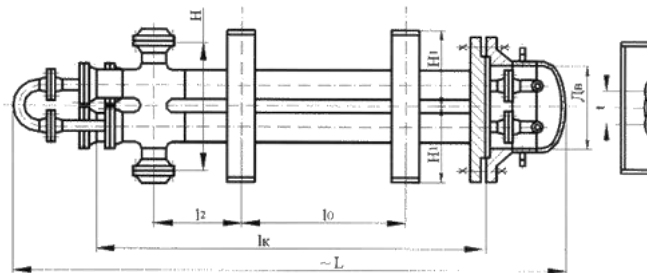


Рис. 3 Трубчастий теплообмінник побічно-випарного типу з зовнішнім зволоженням труб

Трубчасті конструкції характеризуються високою надійністю та стійкістю до температурних і механічних навантажень, однак мають меншу питому площу теплообміну та більші габарити порівняно з пластинчастими схемами.

Конструктивні рішення для інтенсифікації тепломасообміну. Для підвищення ефективності теплообміну в сучасних

теплообмінниках побічно-випарного типу широко застосовуються капілярно-пористі матеріали, які забезпечують рівномірне змочування теплообмінних поверхонь і формування тонкої водяної плівки. Такі матеріали зменшують локальні теплові опори та стабілізують процес випаровування. Схема застосування капілярно-пористого шару наведена на рис. 4



Рис. 4. Схема використання капілярно-пористого матеріалу на зволоженій поверхні теплообмінника

Крім того, використовуються оребрені та гофровані поверхні, які збільшують площу теплообміну та інтенсифікують конвективні процеси. Однак такі рішення потребують оптимізації, оскільки надмірне ускладнення геометрії може призводити до зростання аеродинамічного опору.

Матеріали та конструктивні обмеження

Сучасні теплообмінники побічно-випарного типу виготовляються як із металів (алюміній, нержавіюча сталь), так і з полімерних або композитних матеріалів, що характеризуються високою корозійною стійкістю та біологічною інертністю. Застосування полімерів дозволяє зменшити масу теплообмінника та підвищити його довговічність в умовах агресивних середовищ, характерних для біогазових і біомасових когенераційних установок. Узагальнена схема матеріального виконання теплообмінника наведена на рис. 3.5

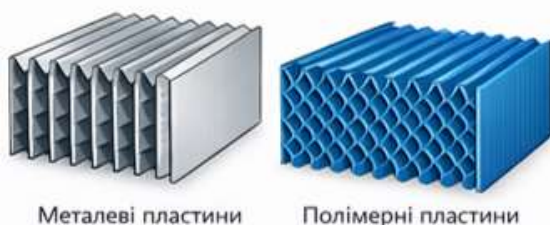


Рис. 5 Матеріальне виконання теплообмінників побічно-випарного типу (металеві та полімерні елементи)

Окрему увагу при проектуванні теплообмінників приділяють зменшенню аеродинамічного опору та оптимізації витрат води, що досягається шляхом раціонального профілювання каналів, застосування систем рівномірного розподілу води та автоматизованого керування зволоженням.

Розглянуті конструктивні схеми демонструють, що ефективність теплообмінників побічно-випарного типу значною мірою визначається вибором конструктивної схеми, матеріалів та способів інтенсифікації тепломасообміну. Пластинчасті та каналні

теплообмінники є найбільш доцільними для інтеграції в когенераційні системи на основі відновлюваних джерел енергії завдяки їх компактності та високій ефективності, тоді як трубчасті конструкції забезпечують підвищену надійність у складних умовах експлуатації.

Застосування в когенераційних системах на основі ВДЕ. Теплообмінники побічно-випарного типу (Indirect Evaporative Coolers, IEC) знаходять широке застосування в когенераційних установках на базі відновлюваних джерел енергії з метою підвищення енергетичної ефективності та стабілізації теплових режимів роботи обладнання. Основними напрямками їх використання є охолодження повітря, що подається в енергетичні установки, а також утилізація низькопотенційного скидного тепла.

У когенераційних системах на базі біогазових двигунів внутрішнього згоряння теплообмінники побічно-випарного типу застосовуються переважно для охолодження впускного повітря. Зниження температури повітря на вході в двигун призводить до збільшення його густини, покращення процесу наповнення циліндрів і, як наслідок, до зростання електричної потужності та електричного ККД установки. Типовий приріст електричної ефективності при цьому становить від 1 до 4 % залежно від кліматичних умов та конструктивних особливостей теплообмінника.

У газотурбінних і мікротурбінних установках на біогазі або синтез-газі теплообмінники побічно-випарного типу використовуються для охолодження повітря на вході в компресор. Це дозволяє зменшити споживану потужність компресора, знизити температурні навантаження на лопатки турбіни та підвищити загальну надійність установки. Для таких систем характерний приріст електричної ефективності на рівні 1-3 %.

Окремим напрямком застосування IEC є охолодження допоміжних контурів когенераційних установок, зокрема контурів охолодження мастила або водяних контурів, через повітряні теплообмінники. У цьому випадку побічно-випарне охолодження дозволяє зменшити температуру охолоджувального середовища без використання

компресійних холодильних машин, що знижує власне енергоспоживання установки.

У системах утилізації низькопотенційного скидного тепла (тепле повітря, димові гази, нагріті поверхні теплообмінників) теплообмінники побічно-випарного типу застосовуються для зниження температури відпрацьованих потоків і підвищення загального коефіцієнта використання теплоти палива. Це особливо актуально для біомасових і біогазових когенераційних установок, де значна

частина теплоти має низький температурний потенціал. У гібридних енергетичних системах, що поєднують когенерацію з сонячною тепловою енергетикою, ІЕС використовуються для зниження температурних навантажень на обладнання в пікові періоди, стабілізації режимів роботи та підвищення експлуатаційної надійності. Побічно-випарне охолодження в таких системах дозволяє ефективно використовувати водні ресурси замість електричної енергії для охолодження.

Таблиця 1.

Матриця застосування теплообмінників побічно-випарного типу

Напрямок застосування ІЕС	Біогазова ДВЗ	Мікротурбіна	Біомаса СНР	Гібрид сонячна + СНР
Охолодження повітря на впуску	3	3	1	2
Охолодження допоміжних контурів	3	2	2	2
Утилізація низькопотенційного скидного тепла	2	2	3	2
Підготовка повітря / мікроклімат	2	1	2	3
Охолодження повітря паливних елементів	1	0	0	1

в когенераційних системах на основі ВДЕ. Оцінка доцільності застосування: 0 - не застосовується, 1 - обмежено, 2 - доцільно, 3 - висока доцільність

Таблиця 2.

Вплив застосування ІЕС на енергетичні показники когенераційних систем

Тип когенераційної установки	Функція ІЕС	Очікуваний ефект
ДВЗ на біогазі	Охолодження впускного повітря	+1...+4 % електричної ефективності
Мікротурбіна	Охолодження повітря перед компресором	+1...+3 % електричної ефективності
Біомаса СНР	Утилізація скидного тепла	Підвищення загального ККД
Гібридна сонячна система	Зниження температурних навантажень	Підвищення надійності
Агропереробка (мікроклімат)	Підготовка повітря без компресії	Зменшення електроспоживання

Таблиця 3.

Типові експлуатаційні параметри теплообмінників побічно-випарного типу

Параметр	Типове значення
Зниження температури повітря	5-15 °С
Питомі витрати води	0,3-1,5 л/кВт·год
Робочий принцип	Непряме випаровування
Конструктивне виконання	Пластинчасте, каналне
Ключові обмеження	Вологість повітря, якість води

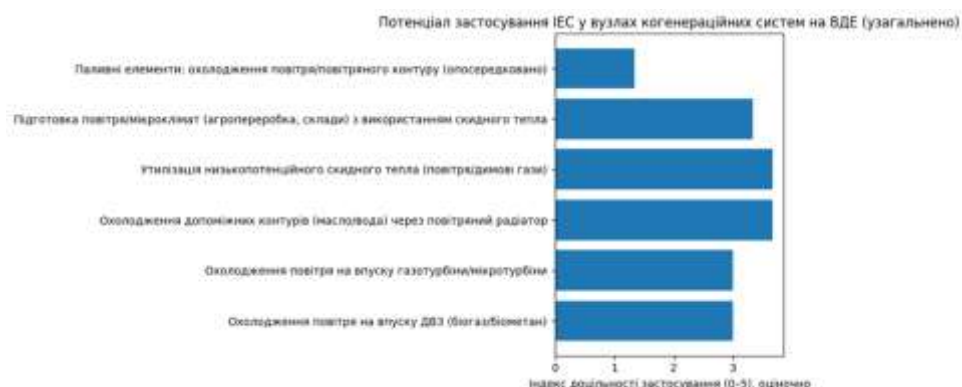


Рис. 6. Потенціал застосування ІЕС за напрямками

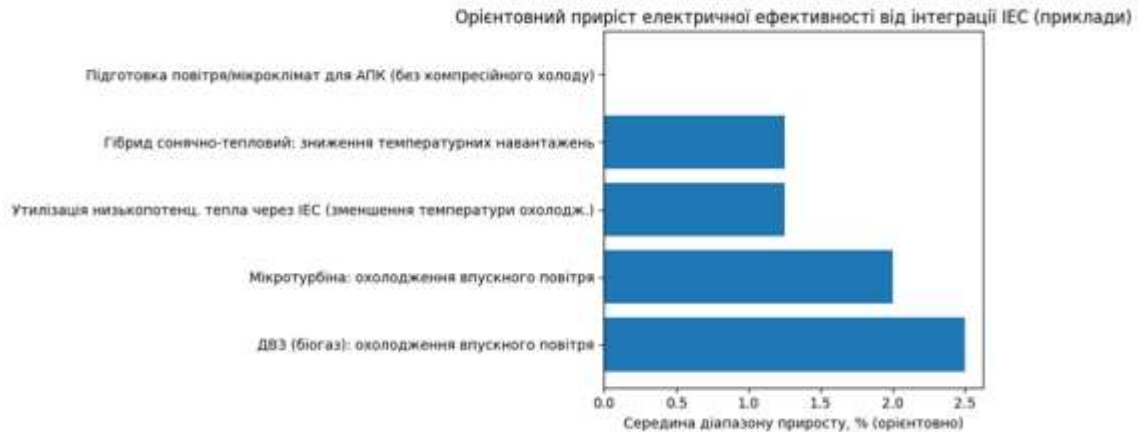


Рис. 7. Орієнтовний приріст електричної ефективності від застосування ІЕС

Наведені значення є оціночними та залежать від кліматичних умов, конструкції теплообмінника побічно-випарного типу та режимів роботи когенераційної установки.

Переваги та обмеження

Основними перевагами теплообмінників побічно-випарного типу є висока енергоефективність, відносно проста конструкція, низькі експлуатаційні витрати та можливість інтеграції в існуючі когенераційні схеми. До недоліків слід віднести залежність ефективності від кліматичних умов, необхідність водопідготовки та контроль за мікробіологічними процесами на зволжених поверхнях.

Ефективність застосування теплообмінників побічно-випарного типу в

когенераційних системах на основі відновлюваних джерел енергії значною мірою визначається поєднанням їх технічних переваг і експлуатаційних обмежень. Умови роботи таких теплообмінників, зокрема кліматичні фактори, доступність водних ресурсів та вимоги до надійності обладнання, суттєво впливають на доцільність їх використання в конкретних енергетичних схемах.

У роботі наведено порівняльний аналіз основних переваг і обмежень теплообмінників побічно-випарного типу, а також сформульовано практичні рекомендації щодо їх застосування в когенераційних системах підприємств агропромислового комплексу та установках на основі відновлюваних джерел енергії.

Таблиця 4.

Порівняльна характеристика теплообмінників побічно-випарного типу

Критерій оцінювання	Теплообмінники побічно-випарного типу	Традиційні теплообмінники / компресійні системи
Енергоефективність	Висока, використовується латентна теплота випаровування	Середня або висока, але з великими енерговитратами
Споживання електроенергії	Низьке (вентилятори, насос)	Високе (компресори, холодильні машини)
Конструктивна складність	Відносно проста	Складніша
Експлуатаційні витрати	Низькі	Високі
Капітальні витрати	Низькі-середні	Середні-високі
Екологічність	Висока (без холодоагентів)	Обмежена (холодоагенти, масла)
Гнучкість інтеграції	Висока	Обмежена
Залежність від клімату	Висока	Низька
Потреба у воді	Так	Ні

Таблиця 5.

Переваги теплообмінників побічно-випарного типу

Перевага	Практичне значення для АПК
Висока енергоефективність	Зниження питомих витрат енергії на виробництво
Низькі експлуатаційні витрати	Економія при безперервній роботі
Проста конструкція	Можливість обслуговування власним персоналом
Відсутність компресійних агрегатів	Підвищення надійності та зменшення аварій
Можливість використання технічної води	Зниження вимог до джерела води
Сумісність з біогазовими установками	Підвищення ККД ДВЗ на біогазі
Покращення мікроклімату	Застосування у тваринництві та зберіганні продукції

Таблиця 6.

Обмеження та потенційні проблеми експлуатації ІЕС

Обмеження	Причина	Наслідки
Залежність від кліматичних умов	Висока вологість повітря	Зниження ефективності охолодження
Потреба у водопідготовці	Солі, біологічні домішки	Накип, біобростання
Ризик мікробіологічного росту	Зволожені поверхні	Погіршення санітарних умов
Необхідність контролю зволоження	Нерівномірна подача води	Зниження теплової ефективності
Обмеження температурного діапазону	Робота поблизу $T_{мокр}$	Неможливість глибокого охолодження

Таблиця 7.

Рекомендації щодо застосування теплообмінників побічно-випарного типу для АПК та ВДЕ

Умови експлуатації	Рекомендоване рішення
Біогазова когенераційна установка	Пластинчастий або каналний ІЕС для охолодження впускного повітря
Тваринницькі приміщення	ІЕС для підготовки повітря та мікроклімату
Регіони з сухим кліматом	Максимальне використання ІЕС
Регіони з вологим кліматом	Регенеративні або гібридні ІЕС
Обмежений бюджет	Простий пластинчастий ІЕС
Високі вимоги до надійності	Полімерні теплообмінники
Використання ВДЕ	Інтеграція з біогазовими та сонячними системами

Таблиця 8.

Узагальнена оцінка доцільності застосування ІЕС для різних напрямів ВДЕ

Напрямок ВДЕ	Доцільність застосування ІЕС	Коментар
Біогазові ДВЗ	Висока	Найбільший ефект
Біомаса СНР	Середня	Доцільна утилізація тепла
Сонячні гібридні системи	Середня-висока	Підвищення надійності
Вітрові системи	Низька	Обмежені можливості
Агропереробка	Висока	Підготовка повітря

Теплообмінники побічно-випарного типу є енергоефективним і економічно доцільним рішенням для когенераційних систем на основі відновлюваних джерел енергії, особливо в умовах агропромислового комплексу. Їх застосування забезпечує зниження експлуатаційних витрат, підвищення

електричної ефективності установок та покращення умов експлуатації обладнання. Разом з тим ефективність таких теплообмінників суттєво залежить від кліматичних умов та якості води, що потребує впровадження систем водопідготовки та контролю зволоження.

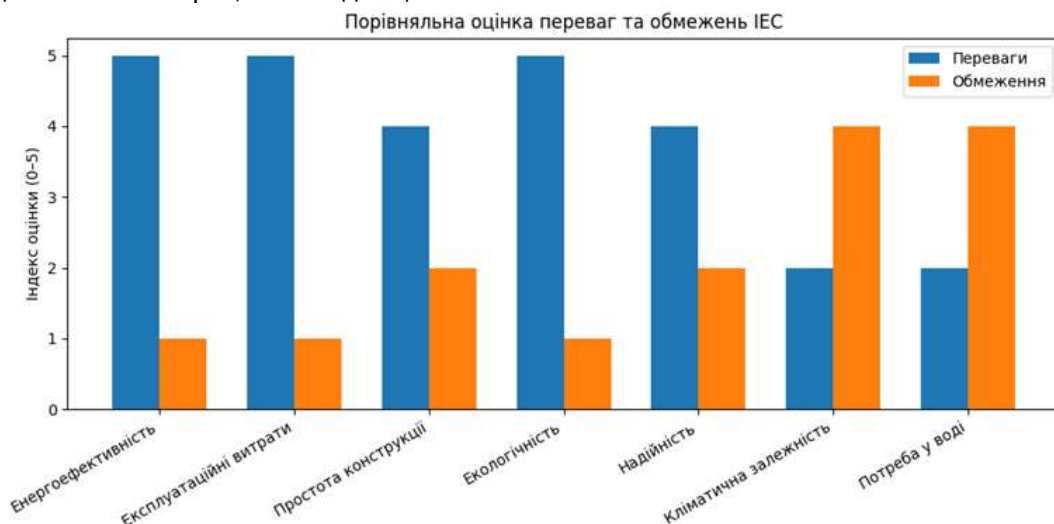


Рис. 8. Порівняльна оцінка переваг та обмежень

З наведеного графіка видно, що теплообмінники побічно-випарного типу характеризуються високою енергоефективністю, екологічністю та низькими експлуатаційними витратами, тоді як основними обмеженнями є залежність ефективності від кліматичних умов та потреба у водних ресурсах.

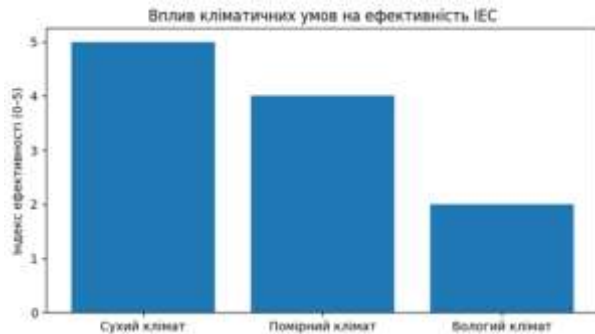


Рис. 9. Вплив кліматичних умов на ефективність

Максимальна ефективність теплообмінників побічно-випарного типу досягається в умовах сухого клімату, де потенціал випаровування є найвищим. У вологих кліматичних умовах ефективність знижується, що потребує застосування регенеративних або гібридних схем охолодження.

Обґрунтування доцільності впровадження спроектованого теплообмінника побічно-випарного типу в когенераційних системах на основі ВДЕ. Проведений аналіз теплообмінників побічно-випарного типу, що застосовуються в когенераційних системах електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії, показав високу ефективність існуючих рішень за умови значної вартості їх виготовлення та конструктивної складності. У зв'язку з цим розроблено та запропоновано до впровадження повітряний теплообмінник побічно-випарного типу з багатошаровою пластинчасто-каналіною будовою та перехресним рухом сухого і зволоженого повітряних потоків, принцип роботи якого ґрунтується на відборі теплоти від сухого повітря через теплопровідні стінки каналів до вологого потоку з інтенсифікацією випаровування, що забезпечує ефективне охолодження без підвищення вологості при знижених витратах на виготовлення й експлуатацію порівняно з відомими аналогами.

Поданий повітряний теплообмінник побічно-випарного типу є ефективним інженерним

рішенням для охолодження повітря в системах вентиляції та кондиціонування без використання компресійних холодильних машин і без зволоження основного повітряного потоку. Аналіз відомих рішень показує, що більшість традиційних систем обмежується рекуперацією чутливої теплоти або реалізує пряме адіабатичне охолодження, що підвищує вологість повітря, і часто характеризується складною конструкцією та високими витратами.

Теплообмінник працює за принципом непрямого (побічного) випарного ефекту, при якому теплота від сухого повітря передається через масонепроникні теплопровідні пластини до вологого потоку, у якому відбувається випаровування води з поглинанням прихованої теплоти. Це дозволяє знижувати температуру припливного повітря без зміни його вологості, що важливо для технологічних і санітарно-гігієнічних вимог.

Конструктивно теплообмінник виконаний у вигляді багатошарового пластинчастого пакета в термоізольованому корпусі. Пластини мають асиметричні поверхні: водонепроникна - для сухих каналів, гіроскопічна - для вологих. Канали формуються розділювальними елементами, розташованими взаємно перпендикулярно, що забезпечує перехресний рух повітряних потоків, рівномірний розподіл температури та інтенсифікацію теплообміну.

Під час роботи припливне повітря проходить через сухі канали, а допоміжний потік - через вологі, контактує з гіроскопічними поверхнями, які зрошуються водою. У вологих каналах відбувається випаровування води, теплота для якого надходить із сухих каналів, що дозволяє охолоджувати повітря без його зволоження та забезпечує стабільність температури й вологості.

Запропонована конструкція підвищує ефективність охолодження, зменшує енергоспоживання в порівнянні з компресійними системами, забезпечує рівномірний температурний розподіл і стабільний режим побічно-випарного охолодження. Простота конструкції та можливість виготовлення з доступних матеріалів роблять теплообмінник доцільним для вентиляційних, кондиціонувальних і мікрокліматичних систем у промислових, агропромислових та цивільних об'єктах.

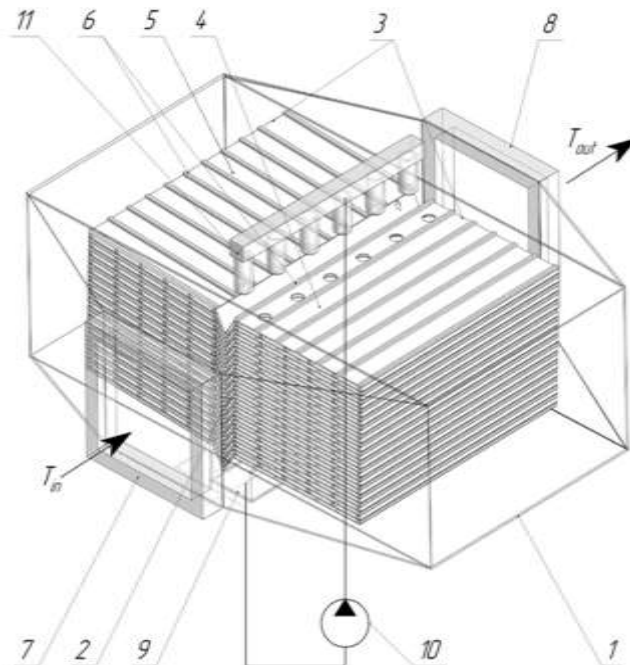


Рис. 10. Конструктивна схема повітряного теплообмінника побічно-випарного типу
Складові елементи: 1. Корпус теплообмінника., 2. Тепломасообмінник., 3. Пластини теплообміну., 4. Сухі канали., 5. Вологі канали., 6. Розділювальні елементи., 7. Вхідний повітряний отвір., 9. Вихідні повітряні отвори., 10. Ємність для води., 11. Насос., 12. Крапельний розподільник

Висновки: Проведений аналіз теплообмінників побічно-випарного типу в когенераційних системах на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) дозволив узагальнити принципи їх роботи, конструктивні схеми (пластинчасті, каналні та трубчасті) та визначити основні напрями застосування у біогазових двигунах внутрішнього згорання, мікротурбінах, біомасових когенераційних установках і гібридних сонячно-теплових системах. Показано, що використання непрямого випарного охолодження (ІЕС) є найбільш доцільним для охолодження впускного повітря енергетичного обладнання та утилізації низькопотенційного скидного тепла, що сприяє стабілізації температурних режимів, підвищенню електричної ефективності та зниженню власного енергоспоживання на потреби охолодження. Встановлено, що найвищий потенціал ефективності забезпечують регенеративні схеми (циклу Майсотсенка), однак для практичного впровадження в умовах агропромислового комплексу найбільш раціональними є пластинчасті та каналні рішення завдяки оптимальному балансу «ефективність-вартість-надійність» і можливості інтеграції в існуючі когенераційні схеми. Водночас визначено ключові обмеження ІЕС: залежність результативності від кліматичних умов (особливо вологості зовнішнього повітря), потреба у водопідготовці та необхідність контролю мікробіологічних процесів на зволжених поверхнях. На підставі порівняльної оцінки сформульовано рекомендації щодо вибору типу теплообмінника та умов його експлуатації для систем ВДЕ й підприємств АПК з урахуванням

доступності водних ресурсів, якості води, вимог до санітарної безпеки та економічних обмежень. Отримані результати створюють основу для подальших досліджень, спрямованих на експериментальне визначення теплотехнічних характеристик ІЕС у реальних режимах роботи когенераційних установок, оптимізацію геометрії каналів і витрат води, а також розроблення регламентів водопідготовки та санітарного обслуговування для забезпечення довготривалої й безпечної експлуатації.

Аналіз існуючих теплообмінників показав високу ефективність традиційних рішень, проте вони характеризуються значною вартістю виготовлення, конструктивною складністю та обмеженою універсальністю. У зв'язку з цим було розроблено новий повітряний теплообмінник побічно-випарного типу з багатошаровою пластинчасто-каналною будовою та перехресним рухом сухого і вологого повітряних потоків. Принцип його роботи ґрунтується на відборі теплоти від сухого повітря через теплопровідні стінки каналів до вологого потоку з інтенсифікацією випаровування, що забезпечує ефективне охолодження без підвищення вологості та при знижених витратах на виготовлення й експлуатацію порівняно з відомими аналогами. Конструктивно теплообмінник виконаний у вигляді багатошарового пластинчастого пакета в термоізолюваному корпусі, де пластини мають асиметричні поверхні: водонепроникну для сухих каналів і гігроскопічну для вологих. Канали формуються розділювальними елементами, розташованими перпендикулярно один до одного,



що забезпечує перехресний рух повітряних потоків, рівномірний розподіл температури та інтенсифікацію теплообміну.

Під час роботи припливне повітря проходить через сухі канали, а допоміжний потік - через вологі, контактує з гігроскопічними поверхнями, які зрошуються водою. У вологих каналах відбувається випаровування води, теплота для якого надходить із сухих каналів, що дозволяє охолоджувати повітря без його зволоження та забезпечує стабільність температури й вологості. Така конструкція підвищує ефективність охолодження, зменшує енергоспоживання в порівнянні з компресійними системами, забезпечує рівномірний температурний розподіл і стабільний режим побічно-випарного охолодження. Простота конструкції та можливість виготовлення з доступних матеріалів робить теплообмінник доцільним для вентиляційних, кондиціонувальних і мікрокліматичних систем у промислових, агропромислових та цивільних об'єктах.

Запропонований теплообмінник має ряд переваг порівняно з традиційними рішеннями. Він забезпечує охолодження без підвищення вологості, тоді як більшість відомих систем обмежується рекуперацією чутливої теплоти або прямим адіабатичним охолодженням, що збільшує вологість повітря. Конструкція нового теплообмінника є простішою і економічно доцільною, при цьому досягається висока ефективність теплообміну завдяки багатшаровій пластинчасто-канальній структурі та перехресному руху потоків. Вона забезпечує стабільність температури і рівномірний розподіл повітряного потоку, що підвищує надійність і ефективність роботи когенераційних систем. Новий теплообмінник універсальний, легко інтегрується в існуючі системи вентиляції, кондиціонування та когенераційні установки на базі ВДЕ, і поєднує баланс «ефективність-вартість-надійність», що робить його більш доцільним для практичного впровадження в агропромислових, промислових та цивільних об'єктах.

Список використаних джерел

1. Stadnik M., Shtuts A., Kolisnyk M., Nryhorenko N. Research on the implementation of intelligent systems to increase the reliability and efficiency of the operation of electric power complexes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 1 (128). С. 122-134. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-1-14
2. Гбур, З. (2024). Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні: можливості, бар'єри та перспективи. *Публічне управління: концепції, парадигма, розвиток, удосконалення*. (10), 36-44. DOI: 10.31470/2786-6246-2024-10-36-44.
3. Селіхов Ю.А., Горбунов К.О. Інтеграція роботи теплоенергетичної установки. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2023. №1. С62-68. DOI: 10.20998/2078-5364.2023.1.07
4. Репін Ю., Грищенко С., Климчук Н., Сергеев М., Ткачов, О. Ефективність роботи теплових насосів із відбором теплоти від ґрунту та зовнішнього повітря в житлових будинках. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. № 60(2). С. 122-120. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2951>
5. Проц Л. А., Фордзюн Ю. І., Лютий Є. М. Інтеграція теплотехнічних процесів у проектування енергоефективних машинобудівних систем. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Том 1 № 1(92) С. 190-197. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.24>
6. Здирко Н.Г., Томашук І.В. Оцінка сучасного стану обліку біоенергетичних активів в аграрних підприємствах України. *Бізнес-навігатор*. 2025. Вип. 2 (79). С. 49-57. DOI: <https://doi.org/10.32782/business-navigator.79-9>
7. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Комар А. С., Акулов В. Д. Технологічні аспекти оптимізації біогазових установок *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2025. Вип. 15, т. 1. С. 129-135. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-15>.
8. Коробко В. В. Залежність характеристик термоакустичного двигуна від неоднорідності температури поверхонь теплообмінників. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020, № 5(165). С. 96-102. DOI: 10.32620/akt.2020.5.12
9. Khalatov, A., Fialko, N. Gas turbine and gas piston power plants for distributed energy sector of Ukraine. *System Research in Energy*. 2025. 1 (81), 4-14. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.004>
10. Маляренко В. А., Шубенко О. Л., Андреев С. Ю., Бабак М. Ю., Сенецький О. В. Когенераційні технології в малій енергетиці. *Монографія*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2018. 454 с
11. Климчук О. А., Лузанська Г. В., Кандеева В. В., Аксьонова І. В., Борохов І. В. Шляхи підвищення енергоефективності роботи тепломасообмінних установок систем низькотемпературного комбінованого опалення при використанні альтернативних джерел енергії. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, Том 2. С. 1-10. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-33
12. Ковязін О. С., Чижиков І. О., Дереза С. В., Пастушенко А. С. Аналіз альтернативних джерел енергії для терморегуляції повітря у тваринницьких. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2025. Вип. 15, т. 1. С. 61-67. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-6>.
13. Босий, М. В. Теплові насоси для тепlopостачання та гарячого водopостачання агропромислових підприємств. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2022. 2(48), С. 3-8. DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.1>
14. Alekseik Y., Alekseik O. Конструкції теплообмінних апаратів на двофазних



теплопередавальних елементах для утилізації теплоти повітря у вентиляційних системах: огляд. *KPI Science News*. 2022.135(1-2), 11-25. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.264595>

15. Грицук І., Худяков І., Погорлецький Д., Черненко В., Котов А., Задорожній В. Особливості оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, 2025. (51), 275-290. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344965>.

16. Бобров, Є. А. Поточний стан розвитку відновлювальних джерел енергії в країнах ЄС. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2020. (1 (57), 32-38. <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2020-57-32-38>

17. Яропуд В. М. Експериментальні дослідження повітряного теплообмінника побічно-випарного типу. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 2 (113). С. 55-65. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-6>, 2024.

18. Babak V., Nikitin Y., Teslenko O. (). Holistic approach to the systemic transformation of the electric power industry, district heating and municipal infrastructure. *System Research in Energy*. 2024 (4 (80). С. 6-25. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.006>

19. Писаревський І. О.; Мукмінов І. І.; Альтман Е. І. Використання кільцевих каналів із пористим заповненням для утилізації низькопотенційного тепла. *Refrigeration Engineering Technology*. 2025, 61.2. DOI: 10.15673/ret.v61i2.3180

20. Халатов А., Борисов І., Кобзар С., Коваленко Г., Доник Т., Шіхабутінова О. Теплообмін і гідродинаміка в полях відцентрових масових сил. *Монографія*. 2024. 119 с. DOI: <https://doi.org/10.23877/978-966-981-979-6>

21. Kutnyi B. A., Pavlenko A. M. Математичне моделювання фазово-перехідних процесів у газорідних системах. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2018. (4). С. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175645>.

22. Подлесний А., Петренко А. (). Утилізація теплоти у вентиляційних системах: огляд сучасних технологій, енергоефективність та протидія обмерзанню. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2025. 54. С. 52-75. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.52-75>.

23. Назарова І. О. Утилізація теплоти димових газів котельних агрегатів у теплообмінному апараті контактного типу. *Вчені записки імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33 (72) № 1. С. 212-216. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/32>.

24. Грицук І. В., Худяков І. В., Погорлецький Д. С., Черненко В. В., Котов А. І., Задорожній В. К. Особливості оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі

експлуатації на основі технології цифрових двійників. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, 2025, 51: 275-290. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344965>.

25. Стаднік М., Штуць А., Колісник М., Григоренко Н. Застосування інтелектуальних систем для підвищення надійності та ефективності функціонування електроенергетичних мереж. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2025. Том 347 № 1. С. 291-299. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-347-38

26. Стаднік М.І., Штуць А.А., Єленич А.П. Дослідження методу забезпечення автономного електропостачання тваринницької ферми на основі комбінування базових та стохастичних джерел енергії. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. №1 (116). С. 63-74. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-8

27. Стаднік М.І., Штуць А.А., Пилипенко О.В. Рівень енергозабезпечення тваринницьких ферм за рахунок біогазу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 100 -112. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-12

References

1. Stadnik M., Shtuts A., Kolisnyk M., Hryhorenko N. (2025). Research on the implementation of intelligent systems to increase the reliability and efficiency of the operation of electric power complexes. *Engineering, Energy, Transport AIC*. No. 1 (128). P. 122-134. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-1-14

2. Hbur Z. (2024). Development of renewable energy sources in Ukraine: opportunities, barriers and prospects. *Public Administration: Concepts, Paradigm, Development, Improvement*. No. 10. P. 36-44. DOI: 10.31470/2786-6246-2024-10-36-44

3. Selikhov Y. A., Horbunov K. O. (2023). Integration of thermal power plant operation. *Integrated. Technologies and Energy Saving*. No. 1. P. 62-68. DOI: 10.20998/2078-5364.2023.1.07

4. Riepin Y., Hryshchenko S., Klymchuk N., Serheiev M., Tkachov O. (2024). Efficiency of heat pumps using ground and ambient air heat in residential buildings. *Refrigeration Engineering and Technology*. Vol. 60(2). P. 122-130. <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2951>

5. Prots L. A., Fordziun Y. I., Liutyi Y. M. (2025). Integration of thermal engineering processes in the design of energy-efficient mechanical engineering systems. *Bulletin of Kherson National Technical University*. Vol. 1. No. 1(92). P. 190-197. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.24>

6. Zdyrko N. G., Tomashuk I. V. (2025). Assessment of the current state of accounting of bioenergy assets in agricultural enterprises of Ukraine. *Business Navigator*. No. 2 (79). P. 49-57. <https://doi.org/10.32782/business-navigator.79-9>

7. Skliar O. G., Skliar R. V., Komar A. S., Akulov V. D. (2025). Technological aspects of



optimization of biogas plants. *Scientific Bulletin of Tavria State Agrotechnological University. Technical Sciences*. Vol. 15(1). P. 129-135. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-15>

8. Korobko V. V. (2020). Dependence of thermoacoustic engine characteristics on the temperature non-uniformity of heat exchanger surfaces. *Aerospace Engineering and Technology*. No. 5(165). P. 96-102. DOI: 10.32620/akt.2020.5.12

9. Khalatov A., Fialko N. (2025). Gas turbine and gas piston power plants for the distributed energy sector of Ukraine. *System Research in Energy*. Vol. 1(81). P. 4-14. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.004>

10. Maliarenko V. A., Shubenko O. L., Andrieiev S. Y., Babak M. Y., Senetskyi O. V. (2018). Cogeneration technologies in small-scale energy. *Kharkiv: O. M. Beketov National University of Urban Economy*. 454 p.

11. Klymchuk O. A., Luzhanska H. V., Kandieieva V. V., Aksyonova I. V., Borokhov I. V. (2021). Ways to improve energy efficiency of heat and mass transfer equipment in low-temperature combined heating systems using alternative energy sources. *Scientific Bulletin of TSATU*. Vol. 11(2). P. 1-10. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-33

12. Koviazyin O. S., Chyzykhov I. O., Dereza S. V., Pastushenko A. S. (2025). Analysis of alternative energy sources for air thermal regulation in livestock facilities. *Scientific Bulletin of TSATU. Technical Sciences*. Vol. 15(1). P. 61-67. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-6>

13. Bosyi M. V. (2022). Heat pumps for heat and hot water supply of agro-industrial enterprises. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. Vol. 2(48). P. 3-8. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.1>

14. Alekseik Y., Alekseik O. (2022). Designs of heat exchangers with two-phase heat transfer elements for heat recovery in ventilation systems: review. *KPI Science News*. Vol. 135(1-2). P. 11-25. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.264595>

15. Hrytsuk I., Khudiakov I., Pohorletskyi D., Chernenko V., Kotov A., Zadorozhnyi V. (2025). Features of assessment and forecasting of the condition of marine heat exchangers based on digital twin technology. *Bulletin of Pryazovskyi State Technical University. Technical Sciences*. No. 51. P. 275-290. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344965>

16. Bobrov Y. A. (2020). Current state of renewable energy development in EU countries. *Scientific Notes of "KROK" University*. No. 1(57). P. 32-38. <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2020-57-32-38>

17. Yaropud V. M. (2024). Experimental studies of an indirect evaporative air heat exchanger. *Vibrations in Engineering and Technology*. No. 2(113). P. 55-65. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-6>

18. Babak V., Nikitin Y., Teslenko O. (2024). Holistic approach to the systemic transformation of the electric power industry, district heating and municipal infrastructure. *System Research in Energy*. Vol. 4(80). P.

6-25. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.006>

19. Pysarevskiy I. O., Mukminov I. I., Altman E. I. (2025). Use of annular channels with porous filling for low-potential heat recovery. *Refrigeration Engineering and Technology*. Vol. 61(2). <https://doi.org/10.15673/ret.v61i2.3180>

20. Khalatov A., Borysov I., Kobzar S., Kovalenko H., Donyk T., Shikhabutynova O. (2024). Heat transfer and hydrodynamics in fields of centrifugal mass forces. *Monograph*. 119 p. <https://doi.org/10.23877/978-966-981-979-6>

21. Kutnyi B. A., Pavlenko A. M. (2018). Mathematical modeling of phase transition processes in gas-liquid systems. *Energy: Economics, Technology, Ecology*. No. 4. P. 105-114. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175645>

22. Podliesnyi A., Petrenko A. (2025). Heat recovery in ventilation systems: modern technologies, energy efficiency and anti-icing methods. *Ventilation, Lighting and Heat Gas Supply*. No. 54. P. 52-75. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.52-75>

23. Nazarova I. O. (2022). Heat recovery of flue gases from boiler units in a contact heat exchanger. *Scientific Notes named after V.I. Vernadskyi. Technical Sciences*. Vol. 33(72). No. 1. P. 212-216. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/32>

24. Hrytsuk I. V., Khudiakov I. V., Pohorletskyi D. S., Chernenko V. V., Kotov A. I., Zadorozhnyi V. K. (2025). Features of assessment and forecasting of the condition of marine heat exchangers. *Bulletin of PSTU. Technical Sciences*. No. 51. P. 275-290. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344965>

25. Stadnik M., Shtuts A., Kolisnyk M., Hryhorenko N. (2025). Application of intelligent systems to improve reliability and efficiency of electric power networks. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. Vol. 347. No. 1. P. 291-299. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-347-38

26. Stadnik M. I., Shtuts A. A., Yelenych A. P. (2025). Research on the method of autonomous power supply of a livestock farm based on combined energy sources. *Vibrations in Engineering and Technology*. No. 1(116). P. 63-74. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-8

27. Stadnik M. I., Shtuts A. A., Pylypenko O. V. (2021). Level of energy supply of livestock farms using biogas. *Engineering, Energy, Transport AIC*. No. 1(112). P. 100-112. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-12

ANALYSIS OF SIDE-EVAPORATIVE HEAT EXCHANGERS IN COGENERATION POWER SUPPLY SYSTEMS BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

The article provides a comprehensive analytical review of indirect evaporative coolers (IEC) as a promising element for improving the energy efficiency of cogeneration systems based on renewable energy sources. The relevance of the study is обусловлена the need for the rational use of low-potential heat flows characteristic of biogas, biomass,



and hybrid power plants, as well as the reduction of specific energy consumption for cooling under conditions of a growing share of renewable energy in the energy balance.

The prerequisites and main directions for the application of indirect evaporative coolers for cooling the air supplied to internal combustion engines operating on biogas, gas turbine and microturbine units, as well as for the utilization of low-potential waste heat, are considered. The physical principles of IEC operation are analyzed, which are based on indirect heat and mass transfer using the latent heat of water evaporation, ensuring intensified heat transfer under conditions of limited temperature differences.

The paper systematizes the main design solutions of indirect evaporative coolers, including plate-type, channel-type, and tubular configurations, as well as modern methods for intensifying heat and mass transfer through the use of capillary-porous materials, finned surfaces, and polymer and composite heat-

exchange elements. A comparative assessment of industrial solutions offered by leading global manufacturers is presented according to the criteria of thermal efficiency, operational reliability, and economic feasibility of implementation.

It is shown that the greatest effect from the use of indirect evaporative coolers is achieved in biogas-based cogeneration systems through the cooling of intake air, which contributes to increasing electrical efficiency, stabilizing thermal operating conditions, and reducing internal energy consumption. Practical recommendations are formulated for selecting the IEC type for agro-industrial enterprises, taking into account climatic operating conditions, water quality, equipment service life requirements, and capital cost limitations.

Keywords: indirect evaporative cooling, heat exchanger, cogeneration, biogas, biomass, renewable energy sources, agro-industrial complex, low-potential heat recovery, energy efficiency.

Відомості про авторів

Яропуд Віталій Миколайович, д.т.н., доцент, декан «Інженерно-технологічного факультету» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна. yaropud77@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

Штуць Андрій Анатолійович - к.т.н., доцент, кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Колісник Микола Анатолійович - доктор філософії з матеріалознавства, старший викладач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: kolisnik30@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).

Липницький Роман Миколайович - асистент кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна. lroma5105@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3711-5632>).

Yaropud Vitalii, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine yaropud77@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

Shtuts Andrii - Ph.D., Senior Lecturer., Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Kolisnyk Mykola - Doctor of Philosophy in Materials Science, Senior Lecturer Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: kolisnik30@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).

Lypnytskyi Roman - Assistant of the Department of Agroengineering and Technical Service, Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine. lroma5105@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3711-5632>).

Стаття надійшла 30.01.2026

Стаття прийнята 12.02.2026

Опубліковано 17.04.2026