

І. Б. Рябова, канд. техн. наук, професор, Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор,
Т. В. Школьнікова, канд. техн. наук, доцент,
Г. В. Пономаренко, канд. техн. наук, доцент, Л. А. Гарєв, аспірант

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: системи кондиціонування повітря, зрошувані насадки, випарне охолодження, термодинамічна ефективність, термогідродинамічні характеристики, інтенсифікація процесів тепло- та масообміну.

Починаючи з другої половини ХХ століття, системи кондиціонування повітря набули широкого поширення для створення комфортних мікрокліматичних умов у житлових, громадських та виробничих будівлях. Основною метою кондиціонування є підтримання заданих параметрів повітря – насамперед температури та відносної вологості – відповідно до санітарно-гігієнічних і технологічних вимог. За даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), на потреби охолодження повітря нині припадає близько 10 % світового споживання електроенергії, причому ця частка має стійку тенденцію до зростання [1]. У ряді регіонів із жарким кліматом, а також у промислових і громадських будівлях, частка енергії, що витрачається на охолодження, може сягати 20–30 % від загального енергоспоживання. Таким чином, ефективність систем кондиціонування безпосередньо впливає на енергетичний баланс як окремих підприємств, так і цілих енергосистем. Сучасні тенденції кліматичних змін, зокрема підвищення середньорічної температури та частоти екстремальних теплових періодів, призводять до постійного зростання попиту на холод у побутовому, комерційному та промисловому секторах.

З іншого боку, фундаментом для створення конкурентоспроможної економіки є зниження енергоемності виробництва та скорочення питомих витрат енергії на одиницю продукції. Для України це завдання набуло особливої актуальності в умовах повномасштабного вторгнення, втрати частини енергогенеруючих потужностей та зростання цін на енергоносії на світовому ринку.

З урахуванням того, що системи кондиціонування сьогодні активно впроваджуються не лише у житлових та офісних приміщеннях, а й у сферах агропромислового виробництва, зберігання сільськогосподарської продукції, фармацевтичної, харчової та мікроелектронної промисловості й т.і., надзвичайної важливості набуває пошук технологій, здатних забезпечити отримання охолодженого повітря з мінімальними енергетичними та екологічними витратами. Серед енергоефективних технологій кондиціонування значне місце посідають системи, що використовують випарне охолодження та відновлювальні джерела енергії.

Задоволення потреб кондиціонування повітря може здійснюватися двома принципово різними шляхами: шляхом нарощування обсягів споживання енергоресурсів або завдяки впровадженню нових, енергоефективних технологій охолодження.

Перший підхід, що базується на застосуванні традиційних компресійних чи абсорбційних холодильних машин, має екстенсивний характер, отже, подальше збільшення кількості таких установок неминуче призводить до пропорційного зростання енергоспоживання і, відповідно, навантаження на енергосистему.

Другий, альтернативний шлях розвитку систем кондиціонування, навпаки, відкриває широкий спектр технологічних рішень, серед яких провідне місце посідають методи зниження температури повітря за рахунок процесів випарного охолодження. Принцип їх дії ґрунтується на використанні фізичного процесу випаровування води, під час якого відбувається інтенсивне поглинання теплоти з навколишнього повітря та зниження його температури. Завдяки відсутності потреби у фазових переходах холодоагентів і компресорному стисканні, випарні системи характеризуються значно нижчими енергетичними витратами порівняно з традиційними холодильними машинами. Крім того, вони можуть ефективно поєднуватися з технологіями рекуперації теплоти, використання вторинних енергоресурсів та відновлюваних джерел енергії, що робить їх одним із найперспективніших напрямів розвитку сучасних систем кондиціонування повітря.

Кондиціонери повітря, що застосовують випаровування води для отримання охолодженого повітря, набувають дедалі ширшого практичного використання в різних галузях [2]. Залежно від способу організації процесу тепло- та масообміну між повітрям і водою, системи випарного охолодження поділяють на прямі, непрямі (опосередковані) та комбіновані (гібридні).

Системи прямого випарного охолодження (ПВО) широко застосовуються у житлових і промислових будівлях, а також в об'єктах аграрного призначення (тваринницькі приміщення, теплиці), де їхнє використання стрімко розширюється [3–8]. Такі системи характеризуються високою екологічністю [9], оскільки забезпечують охолодження без застосування хлор- та фторовмісних холодоагентів. Відмова від компресорного стиску холодоагенту знижує споживання електричної енергії порівняно з традиційними компресійними кондиціонерами, що, відповідно, веде до зменшення викидів парникових газів і усунення ризику руйнування озонового шару.

Термодинамічні основи випарного охолодження ґрунтуються на здатності повітря утримувати певну кількість водяної пари, максимальне значення якої при даному атмосферному тиску, як відомо, визначається виключно температурою.

Принцип дії систем ПВО базується на процесі **адіабатичного випаровування води**. Коли сухе повітря проходить через зволожувальну (випарну) насадку, його температура знижується, вологовміст зростає, а ентальпія повітря залишається сталою. Така зміна стану досягається за рахунок витрачання частини теплоти повітря на фазовий перехід води у водяну пару при контакті з вологою поверхнею насадки [10, 11].

На рис. 1, *a* представлено спрощену схему ПВО [12], основними компонентами якої є вентилятор, що подає потік теплого повітря в систему, та зрошувана випарна насадка. Насадка змочується водою за допомогою розподільної системи форсунок, що забезпечують рівномірне зрошення її контактної поверхні. Надлишки води потрапляють до збірної ємності, з якої відбувається повернення води в систему зрошення. Після проходження через канали зрошуваної насадки, повітря охолоджується і постачається до споживача. Таким чином, при контакті теплого повітря зі зрошеною поверхнею насадки, відбувається адіабатне насичення повітря вологою, його температура зни-

жується (в граничному випадку до температури вологого термометру). Рис. 1б ілюструє схему протікання процесу адіабатного охолодження повітря на психометричній діаграмі. Стан 1 відповідає параметрам зовнішнього повітря, що потрапляє до системи тепловологісної обробки, точка 2 – параметрам зволоженого охолодженого повітря на виході з насадки.

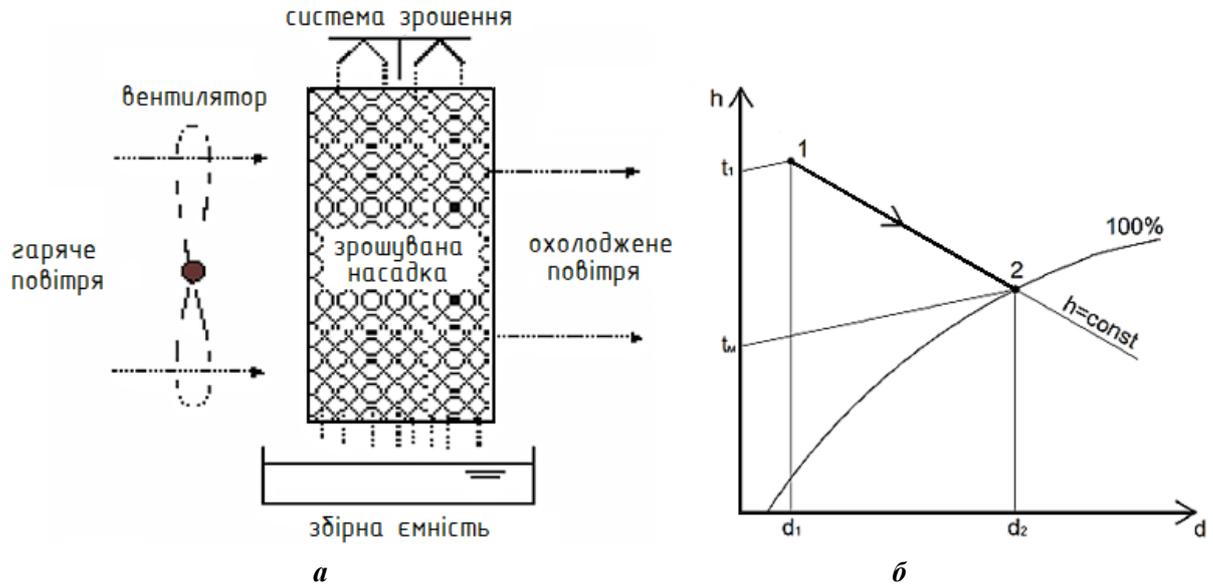


Рисунок 1 – Система прямого випарного охолодження:
 а – принципова схема ПВО; б – схема процесу адіабатного охолодження повітря на психометричній діаграмі

Перевагою такого способу охолодження повітря є низьке енергоспоживання, оскільки електроенергія витрачається лише на привід вентилятора та насоса, що розподіляє воду по поверхні зрошуваної насадки; за рахунок цього економія енергії може досягати 70 % [24] порівняно з традиційними компресійними кондиціонерами, що працюють на холодоагентах. Однак область використання таких повітроохолоджувачів обмежена через те, що максимальна ефективність ПВО досягається лише у кліматі з відносною вологістю влітку близько 30 % [25] (так, наприклад, в місті Одеса в години з максимально високою температурою при використанні системи ПВО можна досягти зменшення температури ≈ 9 °С).

Системи непрямого випарного охолодження повітря (НВО) працюють на основі спеціальних теплообмінників, які використовують приховану теплоту випаровування води для охолодження повітряного потоку без збільшення його вологості (рис. 2). Це дозволяє підтримувати оптимальні термодинамічні параметри в охолоджуваному середовищі. У останні роки такі системи стають все більш поширеними, оскільки забезпечують високу ефективність і мінімізують вплив кондиціонування повітря на навколишнє середовище [13, 14, 15].

В системах НВО процес отримання холоду шляхом використання психометричної різниці температур найпростішим чином реалізується в установках опосередкованого випарного охолодження повітря, де повітря охолоджується при контакті з сухою

кількість теплоти, яку сприймає зворотний потік, стає більшою за рахунок кількості теплоти, що віддається прямим потоком. З теплового балансу випливає, що витрата зворотного потоку менша за прямий, тому частину охолодженого повітря можна використати корисно. Тоді схема змінюється так: охолоджене повітря після сухої поверхні пластини ділиться на корисний потік (у приміщення) та допоміжний (на вологу сторону пластини).

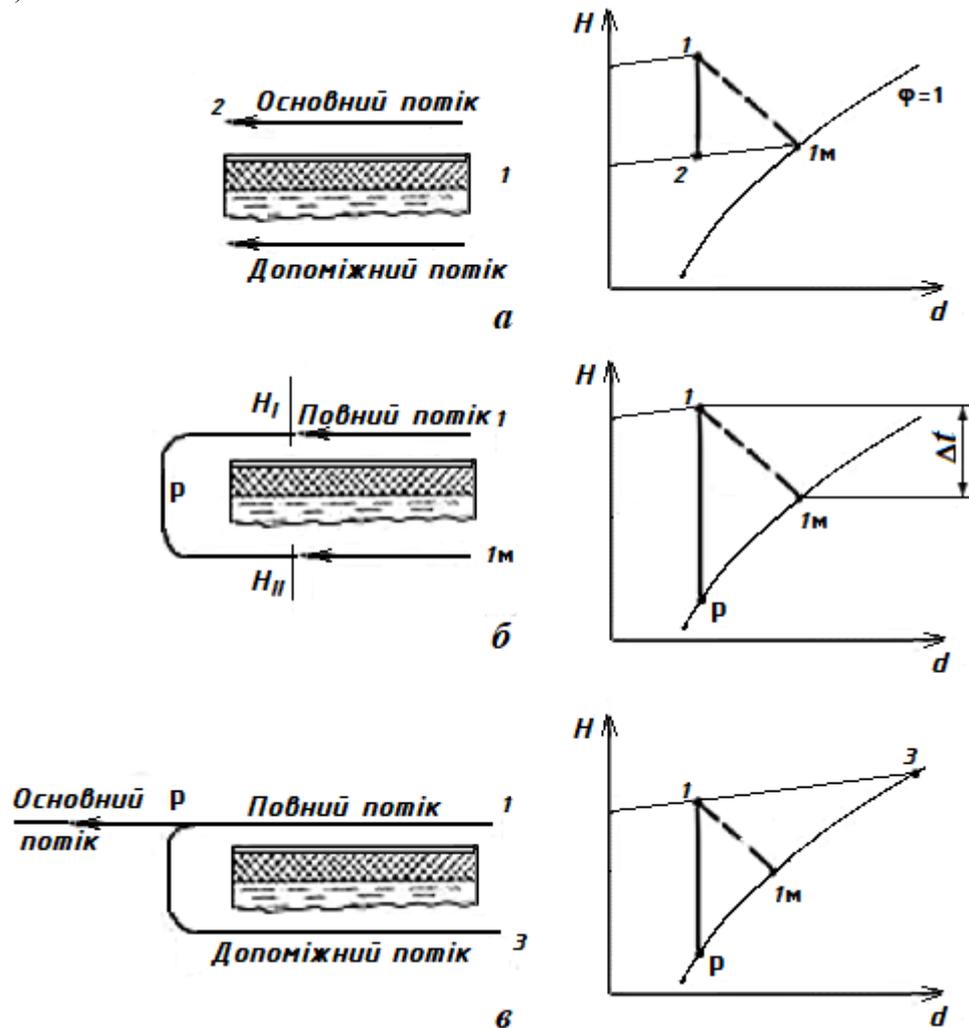


Рисунок 3 – Непряме випарне охолодження:

a – прямопливний рух основного й допоміжного потоків; *б* – протипливний рух основного й допоміжного потоків; *в* – розгалуження повного потоку повітря на сухий і вологий потоки

Також можливо застосовувати каскадну схему (рис. 4) [15], коли частина охолодженого по лінії постійного вологовмісту $d = \text{const}$ повітря використовується після його адиабатичного зволоження для наступного сухого охолодження частини повітря, що залишилася. При досить великій кількості ступеней і значних поверхнях тепло- і масообміну кінцева температура повітря, що охолоджується, може наблизитися до його температури точки роси на вході.

Отже, теоретично межею охолодження при НВО є температура точки роси повітря, що охолоджується.

До безумовних переваг систем кондиціювання повітря з випарним охолоджен-

ням належить суттєве зниження енергоспоживання – у три і більше разів порівняно з традиційними кондиціонерами, що використовують компресійні холодильні установки. Водночас ефективність кожної з таких систем має певні обмеження, переважно зумовлені кліматичними умовами регіону експлуатації, насамперед температурою та відотною вологістю зовнішнього повітря.

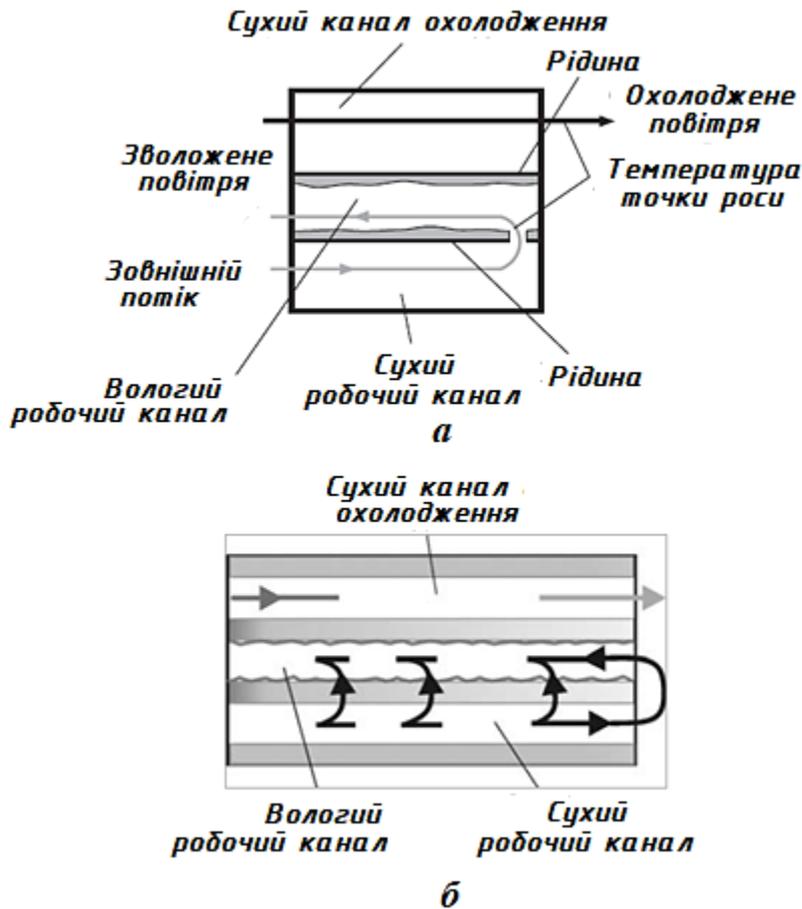


Рисунок 4 – Ділянка протиплинного тепломасообмінного апарата непрямого випарного охолодження:

а – схема з дискретною подачею охолодженого повітря; *б* – схема з безперервною подачею охолодженого повітря

Можливості застосування випарного охолодження повітря в Україні є досить широкими. З огляду на різноманіття кліматичних зон, наведених у табл. 1 [17], можна стверджувати, що потенціал використання систем кондиціонування з випарним охолодженням охоплює значну частину території країни. Водночас для кожної зони доцільно обирати оптимальний тип системи охолодження, враховуючи місцеві метеорологічні умови, рівень відносної вологості та температурні коливання протягом теплого періоду року.

Аналізуючи можливості застосування апаратів з випарного охолодження повітря слід зазначити, що апарати ПВО можуть бути ефективно використані в теплу пору року переважно в районах з посушливим або помірно континентальним кліматом, тобто у степовій частині України. Застосування даного виду кондиціонування повітря доцільне

на об'єктах агропромислового комплексу, де підтримання сталої відносної вологості повітря не є критичним – зокрема у теплицях, тваринницьких комплексах тощо).

В інших кліматичних зонах України більш ефективними є системи непрямого випарного охолодження (НВО). Для підвищення надійності та стабільності роботи систем кондиціонування доцільним є створення гібридних систем, у яких поєднуються переваги випарного охолодження з методами осушення повітря після його тепловологісної обробки.

Потенційні можливості випарного охолодження наведені в табл. 2 [18].

Таблиця 1– Кліматичні зони України

Кліматична зона	Регіон	Тип клімату	Відносна вологість влітку, %
Південна (суха степ)	Одещина Миколаївщина Херсонщина	Сухий степовий	35–55
Східна	Запоріжжя, Дніпро, Донецщина, Луганщина	Континентальний з помірною вологістю	40–60
Центральна	Київ, Вінниця, Черкаси, Кропивницький	Помірно континентальний	50–75
Північна	Житомир, Чернігів, Суми	Помірно вологий	60–75
Західна	Львів, Тернопіль, Івано-Франківськ	Вологий гірський	65–85
Карпати	Закарпаття, Чернівці	Гірський прохолодний	вище 70

Таблиця 2 – Параметри зовнішнього повітря та психрометрична різниця температур для деяких міст України (теплий період)

Місто	Параметри зовнішнього повітря							
	Б						В	
	t , °С	h , кДж/кг	d , г/кг	t_m , °С	d_m , г/кг	$t - t_m$, °С	t , °С	h , кДж/кг
Одеса	28,6	62,0	13,0	21,3	15,9	7,3	38	73,7
Херсон	30,6	61,6	12,0	21,2	15,2	9,4	39	74,6
Київ	28,7	56,1	10,6	19,6	14,3	9,1	39	70,8
Луганськ	31,8	58,7	10,4	20,3	15,0	11,5	40	66,2
Харків	29,4	56,1	10,3	19,6	14,3	9,8	39	76,3

Непряме випарне охолодження з використанням рідкого осушувача є перспекти-

вною альтернативою традиційним парокompресійним системам кондиціонування, оскільки дає змогу одночасно розв'язати низку економічних, екологічних і регуляторних проблем. Такі системи поєднують два основних процеси обробки повітря: видалення вологи в осушувачі та відведення явного тепла в непрямому випарному охолоджувачі за М-циклом. Експериментальні дослідження показують, що зміна осушувальної здатності на першому ступені безпосередньо впливає на охолоджувальну ефективність другого ступеня. Підвищення температури або вологості повітря на вході, а також інтенсивності осушення, веде до зростання загальної продуктивності гібридної системи.

Отже, оцінка термодинамічної ефективності дозволяє встановити принципові межі енергоощадності систем кондиціонування. Проте реальні експлуатаційні показники визначаються також властивостями конструкційних матеріалів, що використовуються у тепломасообмінних апаратах. Розглянемо матеріали, які можуть бути застосовані для виготовлення таких пристроїв у системах з прямим та непрямим випарним охолодженням.

Для обох типів кондиціонерів використовуються теплообмінні поверхні, які можуть виготовлятися з різних матеріалів, доступних на місцевих ринках.

Для систем прямого випарного охолодження на початкових етапах розвитку галузі як матеріал теплообмінних елементів використовували гофровані паперові пластини, просочені фенолформальдегідними смолами для підвищення волого- та біостійкості. Згодом до переліку матеріалів, придатних для виготовлення теплообмінних поверхонь, долучилися полімерні матеріали та металеві пластини зі спеціальними гідрофільними або капілярно-активними покриттями, які забезпечують рівномірне змочування поверхні та підвищують ефективність процесів тепло- і масообміну [19, 20, 21].

Кожен із потенційних матеріалів має власні переваги та обмеження, які необхідно враховувати під час вибору конструкційних елементів тепломасообмінних пристроїв. Так перевагою *целюлозних насадок*, виготовлених з целюлозного волокна або переробленого паперу, часто з додаванням антигнільних та антимікробних компонентів, є висока водоутримувальна здатність, значна ефективність охолодження (приблизно 80–90 %) та екологічність завдяки біорозкладності матеріалу. Водночас до основних недоліків таких насадок належать необхідність періодичної заміни (у середньому кожні 1–3 роки), схильність до утворення біологічних забруднень (цвілі, слизу) та потреба у регулярному технічному обслуговуванні для запобігання деградації матеріалу.

Синтетичні решітки, виготовлені з термостійких полімерів (HDPE, PP, PVC, ABS) відзначаються підвищеною довговічністю (5–10 років і більше), стійкістю до ультрафіолетового випромінювання, дії хімічних реагентів і біологічних чинників (цвілі, бактерій), а також простотою очищення та обслуговування. Разом з тим, їх ефективність випарного охолодження є дещо нижчою, ніж у целюлозних насадок, а для забезпечення необхідного рівня зволоження такі матеріали вимагають підвищеної витрати води.

Композиційні матеріали (скловолокно, полістирол, метал) відзначаються високою міцністю, стійкістю до вологи та корозії, а також довговічністю у експлуатації. Разом із тим їх охолоджувальна здатність є нижчою порівняно з целюлозними або синтетичними насадками, що слід враховувати при виборі матеріалу для конкретних умов роботи системи.

Крім того, для підвищення стійкості теплообмінних поверхонь до мікробіологічного забруднення та засмічення застосовують спеціальні нанопокриття, зокрема срібло, оксид титану (TiO_2) та оксид кремнію (SiO_2), які забезпечують антибактеріальний ефект і покращують довговічність матеріалу.

Слід відзначити, що у країнах з низьким та середнім рівнем доходу вартість імпорту та доставки матеріалів може значно впливати на кінцеву ціну обладнання. Для зменшення цих витрат доцільно використовувати місцеві матеріали та ресурси виробництва [22].

До матеріалів для НВО висуваються специфічні вимоги, які визначаються особливостями теплофізичних процесів у каналах теплообмінників. Зокрема, внутрішня структура апарату передбачає наявність сухих та вологих каналів, розділених тонкою, але міцною мембраною або бар'єром. Матеріал повинен витримувати постійне зволоження в одному з каналів, зберігаючи при цьому форму, не піддаватися засміченню і забезпечувати стабільні параметри тепло- та масообміну. Крім того, пористість, гігроскопічність і стійкість до мікробного росту є критично важливими характеристиками, наявність яких визначає працездатність і надійність системи.

Оскільки для апаратів непрямого випарного охолодження використовуються матеріали, принципово подібні до тих, що застосовуються в апаратах прямого випарного охолодження, їхні переваги та обмеження, як правило, також мають схожий характер [23].

Так, наприклад, *целюлоза з просоченням* є найбільш дешевим матеріалом і забезпечує хорошу зрошеність поверхні. Але її довговічність дуже низька, а органічна структура схильна до утворення плісняви та розмноження бактерій, що обмежує використання лише для бюджетних варіантів систем.

Полімери з мікропористою структурою, подібно до попереднього випадку, мають ряд переваг: вони стійкі до вологи, біостійкі і характеризуються тривалим терміном експлуатації. Але складність виготовлення, низька теплопровідність та відносно висока вартість, порівняно з паперовими пластинами обмежує їхнє широке застосування.

Крім того використовуються *полімерні композити*, у яких між мембранами вводять наповнювач, що формує множинну мікроканалів, здатних утримувати вологу з вологого боку теплообмінного каналу.

Спеціально оброблений *алюміній з анадованим або полімерним покриттям* (можна віднести до композиційних матеріалів) поєднує високу теплопровідність, міцність формування каналів і технологічність поверхні, але через вразливість до корозії без спеціального якісного захисного покриття область застосування таких матеріалів обмежена.

Скловолокно також є дуже стійким до мікробів і впливу вологи, проте низька теплопровідність та неможливість точного формування каналів обмежують його застосування в довгострокових промислових установках.

Серед перспективних і довговічних матеріалів розглядають пористу кераміку та металеві поверхні з гідрофільними покриттями, отриманими хімічним шляхом.

Таким чином, вибір матеріалу для виготовлення зрошених поверхонь визначається призначенням конкретного обладнання.

Розробка високотехнологічних матеріалів, позбавлених зазначених раніше недоліків, та дослідження нових матеріалів є важливою проблемою, вирішення якої за-

безпечить галузь надійними елементами для тепло-масообміну в апаратах ПВО та НВО і сприятиме підвищенню енергоефективності систем кондиціонування.

Вибір матеріалів і конструкційних рішень визначає не лише надійність апаратів, а й енергетичну та економічну ефективність систем. Виходячи з цього, доцільно розглянути напрямки застосування випарного охолодження, де його переваги будуть максимально реалізовані.

Перспективними напрямками застосування систем випарного охолодження повітря в Україні є:

- агропромисловий сектор: овочесховища та зерносховища (охолодження з одночасним зволоженням для запобігання пересушуванню продукції), теплиці, тваринницькі комплекси (зниження температури влітку, створення оптимального мікроклімату);
- комерційні та громадські об'єкти: склади, логістичні центри, спортивні споруди (зали, манежі), торговельні павільйони, ринки – особливо у південних регіонах України (Одеса, Херсон, Запоріжжя), де літо спекотне й сухе;
- енергетика та ІТ-сектор: серверні приміщення (як допоміжна система до традиційного кондиціонування для економії енергії у міжсезоння), електропідстанції, трансформаторні станції, де іноді застосовують випарне охолодження у вентиляційних системах.

Завдяки значній економії енергії при забезпеченні комфортних параметрів повітря системи випарного охолодження можуть бути обладнані автономними джерелами енергії. Для об'єктів сільського господарства, складів і приміщень великої площі доцільно передбачати використання сонячної енергії, що генерується безпосередньо на об'єкті, особливо з урахуванням сезонного характеру експлуатації таких систем.

В Україні задокументоване реальне впровадження випарного охолодження у системах кондиціонування: на пекарні Grupo Vimbo в Дніпрі встановлено шість двоступеневих установок Oхусom IntrCooll із сумарною подачею 84 000 м³/год свіжого охолодженого повітря та заявленою економією витрат порівняно з традиційним кондиціонуванням [26]. В агропромисловому секторі (птахівництво/свинарство) повітряне випарне охолодження є типовим рішенням: на українському ринку офіційно доступні системи Hog Slat (EVAP Systems, касети H2Pad) і відповідні сервісні матеріали, що підтверджує їх фактичне застосування на фермах в Україні, а також технологія RainMaker від Big Dutchman (pad cooling) як галузевий стандарт [27]. Випарні панелі Munters CELdek поширені у вітчизняних постачальників і застосовуються як елемент припливного адиабатичного охолодження (наявні позиції й специфікації на українських сайтах), що підтверджує доступність і використання компоновок на базі pad-media [28]. Окремі промислові підприємства також розглядають адиабатичне повітряне охолодження як захід з ресурсоефективності (EU4Environment/ЮНІДО, харчова промисловість), що демонструє інституційне схвалення підходу для локальних умов.

Однак, на сьогоднішній день потенціал застосування систем випарного охолодження повітря в Україні залишається реалізованим лише частково. Розширення масштабів їх впровадження на промислових та агропромислових підприємствах дозволить суттєво знизити пікові навантаження на енергетичну систему країни у спекотний період року та підвищити енергоефективність виробництв у цілому.

До того ж, публікації про використання систем випарного охолодження повітря всіх типів носять переважно рекламний характер без опису методів розрахунку та кон-

структивних особливостей даного обладнання.

Висновки

Використання систем випарного охолодження повітря є одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності систем кондиціонування. Енергетичний ефект від їх застосування може досягати 30–70 %, залежно від типу системи, кліматичних умов та режимів експлуатації. Разом із тим, для широкого впровадження цієї технології в Україні необхідно реалізувати низку пріоритетних заходів:

- створення та промислове виробництво високоефективних, корозійностійких і довговічних зрошуваних насадок, що сприятиме зниженню вартості обладнання та стимулюватиме його локальне впровадження.

- розробка інженерних методик проектування дозволить оптимізувати параметри систем і розширити сферу їх практичного використання.

- використання енергії відновлювальних джерел для живлення систем випарного охолодження забезпечить додаткове зниження навантаження на енергосистему в пікові літні періоди.

Реалізація зазначених напрямів дозволить забезпечити сталий розвиток технологій охолодження повітря, підвищити енергетичну незалежність та зменшити вуглецевий слід у секторі кліматотехніки України.

Література

1. Keeping cool in a hotter world is using more energy, making efficiency more important than ever. *IEA*. 2023 URL: <https://www.iea.org/commentaries/keeping-cool-in-a-hotter-world-is-using-more-energy-making-efficiency-more-important-than-ever>.

2. Laknizi A., Abdellaha A., Faqirb M., Essadiqib E., Dhimdici S. Performance characterization of a direct evaporative cooling pad based on pottery material. *International journal of sustainable engineering*. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1080/19397038.2019.1677800>.

3. Elattar H. F., Fouda A., Nada S. A. Performance Investigation of a Novel Solar Hybrid Air Conditioning and Humidification–Dehumidification Water Desalination System. *Desalination*. 2016. No. 382. P. 28–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.023>.

4. Davies P. A., Hossain A. K., Vasudevan P. Stand-alone Groundwater Desalination System Using Reverse Osmosis Combined with a Cooled Greenhouse for Use in Arid and Semi-arid Zones of India. *Desalination and Water Treatment*. 2009. No. 5(1–3). P. 223–234. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.520>.

5. Aljubury I. M. A., Ridha H. D. Enhancement of Evaporative Cooling System in a Greenhouse Using Geothermal Energy. *Renewable Energy*. 2017. No. 111. P. 321–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.080>.

6. Bishoyi D., Sudhakar K. Experimental Performance of a Direct Evaporative Cooler in Composite Climate of India. *Energy and Buildings*. 2017. No. 153. P. 190–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.014>.

7. Xu J., Li Y., Wang R. Z., Liu W., and Zhou P. Experimental Performance of Evaporative Cooling Pad Systems in Greenhouses in Humid Subtropical Climates. *Applied Energy*. 2015. No. 138. P. 291–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.061>.

8. Jiaoliao C., Yanwen C., Fang X., Haigen H., Qinglin A. Analysis and Optimization of the Fan-Pad Evaporative Cooling System for Greenhouses Based on CFD. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 2014, Article 712740. P. 1–8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/712740>.
9. Kovačević I., Sourbron M. The Numerical Model for Direct Evaporative Cooler. *Applied Thermal Engineering*. 2017. No. 113. P. 8–19. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025).
10. Camargo J. R., Ebinuma C. D., Silveira J. L. Experimental Performance of a Direct Evaporative Cooler Operating during Summer in a Brazilian City. *International Journal of Refrigeration*. 2005. No. 28 (7). P. 1124–1132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.011>.
11. Sohani A., Sayyaadi H. Design and Retrofit Optimization of the Cellulose Evaporative Cooling Pad Systems at Diverse Climatic Conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2017. No. 123. P. 1396–1418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.120>.
12. Camargo J. R., Ebinuma C. D., Cardoso S. A mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system. *Revista de Engenharia Térmica*. 2003. No. 4(2). P. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.5380/ret.v2i2.3473>.
13. Caruana R., De Antonellis S., Marocco L., Guilizzoni M. Modeling of Indirect Evaporative Cooling Systems: A Review. *Fluids*. 2023. No. 8(11), 303 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids8110303>.
14. Цимерман А. Термодинамические основы косвенно-испарительного охлаждения воздуха. *Отопление. Водоснабжение. Вентиляция. Кондиционеры*. 2013. № 4-5. URL: https://www.truba.ua/library/art-termodynamicheskie_osnovy.
15. Халатов А. А., Карп І. М., Ісаков Б. В. Термодинамічний цикл Майсоценка і перспективи його застосування в Україні. *Вісник НАН України*. 2013. № 2. С. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2013.02.039>.
16. Цимерман А. Б., Майсоценко В. С., Печерская И. М. Косвенно-испарительный воздухоохладитель нового типа. *Холодильная техника*. 1976. № 3. С. 12–17.
17. World Bank Climate Change Knowledge Portal. URL: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>.
18. Дем'яненко Ю. І., Дорошенко О. В., Гоголь М. І. Система кондиціонування повітря на основі випарного охолодження і відкритого абсорбційного циклу. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2020. № 1–2. С. 11–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1824>.
19. Lahnizi A., Mahdaoui M., Abdellah A. B., Anoune K., Bakhouya M., Ezbakhe H. Performance Analysis and Optimal Parameters of a Direct Evaporative Pad Cooling System under the Climate Conditions of Morocco. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. No. 13. P. 100362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.11.013>.
20. Tilahun S. W. Feasibility and Economic Evaluation of Low-cost Evaporative Cooling System in Fruit and Vegetables Storage. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*. 2010. No. 10(8). DOI: <https://doi.org/10.4314/ajfand.v10i8.60885>.
21. Ndukwu M. C., Manuwa S. I. Review of Research and Application of Evaporative Cooling in Preservation of Fresh Agricultural Produce. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2014. No. 7(5). P. 85–102. DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20140705.010>.

22. Abohorlu Doğramacı P., Riffat S., Gan G., Aydın D. Experimental Study of the Potential of Eucalyptus Fibres for Evaporative Cooling. *Renewable Energy*. 2019. No. 131. P. 250–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.005>.

23. Uzair S., Naseem A., Khalid H. A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021. No. 122. Vol. 105140. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0735193321000348>.

24. Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering. *Sustainable Cooling Technology Heats Up*. 2023. URL: <https://wyss.harvard.edu/news/sustainable-cooling-technology-heats-up>.

25. Guanchao Lv, Xu Ji, Bianfeng Yang, Yingxu Chen, Haiyang Xu. Operating modes study of evaporative cooling-dehumidification air conditioning under different climatic conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2024. No. 243, Vol. 122597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122597>.

26. What is the payback time of adiabatic cooling? URL: <https://www.oxycom.com/blog-news/how-quickly-do-you-earn-back-the-costs-of-adiabatic-cooling>.

27. Система випарного охолодження EVAP. URL: <https://www.hogslat.com.ua/systema-vyparnoho-okholodzhennya-evap>.

28. ТОВ «ВАДА». URL: <https://vada.ua/munters-panel-oholodzhennya-celdek-7090-15-1-2960610>.

Bibliography (transliterated)

1. Keeping cool in a hotter world is using more energy, making efficiency more important than ever. *IEA*. 2023 URL: <https://www.iea.org/commentaries/keeping-cool-in-a-hotter-world-is-using-more-energy-making-efficiency-more-important-than-ever>.

2. Laknizi A., Abdellaha A., Faqirb M., Essadiqib E., Dhimdici S. Performance characterization of a direct evaporative cooling pad based on pottery material. *International journal of sustainable engineering*. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1080/19397038.2019.1677800>.

3. Elattar H. F., Fouda A., Nada S. A. Performance Investigation of a Novel Solar Hybrid Air Conditioning and Humidification–Dehumidification Water Desalination System. *Desalination*. 2016. No. 382. P. 28–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.023>.

4. Davies P. A., Hossain A. K., Vasudevan P. Stand-alone Groundwater Desalination System Using Reverse Osmosis Combined with a Cooled Greenhouse for Use in Arid and Semi-arid Zones of India. *Desalination and Water Treatment*. 2009. No. 5(1–3). P. 223–234. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.520>.

5. Aljubury I. M. A., Ridha H. D. Enhancement of Evaporative Cooling System in a Greenhouse Using Geothermal Energy. *Renewable Energy*. 2017. No. 111. P. 321–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.080>.

6. Bishoyi D., Sudhakar K. Experimental Performance of a Direct Evaporative Cooler in Composite Climate of India. *Energy and Buildings*. 2017. No. 153. P. 190–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.014>.

7. Xu J., Li Y., Wang R. Z., Liu W., and Zhou P. Experimental Performance of Evaporative Cooling Pad Systems in Greenhouses in Humid Subtropical Climates. *Applied Energy*.

2015. No. 138. P. 291–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.061>.

8. Jiaoliao C., Yanwen C., Fang X., Haigen H., Qinglin A. Analysis and Optimization of the Fan-Pad Evaporative Cooling System for Greenhouses Based on CFD. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 2014, Article 712740. P. 1–8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/712740>.

9. Kovačević I., Sourbron M. The Numerical Model for Direct Evaporative Cooler. *Applied Thermal Engineering*. 2017. No. 113. P. 8–19. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025).

10. Camargo J. R., Ebinuma C. D., Silveira J. L. Experimental Performance of a Direct Evaporative Cooler Operating during Summer in a Brazilian City. *International Journal of Refrigeration*. 2005. No. 28 (7). P. 1124–1132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.011>.

11. Sohani A., Sayyaadi H. Design and Retrofit Optimization of the Cellulose Evaporative Cooling Pad Systems at Diverse Climatic Conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2017. No. 123. P. 1396–1418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.120>.

12. Camargo J. R., Ebinuma C. D., Cardoso S. A mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system. *Revista de Engenharia Térmica*. 2003. Vol. 2, No. 2. P. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.5380/reterm.v2i2.3473>.

13. Caruana R., De Antonellis S., Marocco L., Guilizzoni M. Modeling of Indirect Evaporative Cooling Systems: A Review. *Fluids*. 2023. No. 8(11), 303 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids8110303>.

14. Tsymerman A. Termodynamicheskiye osnovy kosvenno-isparitel'nogo okhlazhdeniya vozdukh. *Otoplenye. Vodosnabzhenye. Ventyliatsiya. Konditsionery*. 2013. No. 4–5. URL: https://www.truba.ua/library/art-termodynamicheskie_osnovy.

15. Khalatov A. A., Karp I. M., Isakov B. V. Termodynamichniy tsykl Maisotsenka i perspektyvy yoho zastosuvannya v Ukraini. *Visnyk NAN Ukrainy*. 2013. No. 2. P. 38–49 DOI: <https://doi.org/10.15407/vism2013.02.039>.

16. Tsymerman A. B., Maisotsenko V. S., Pecherskaia Y. M. Kosvenno-isparitel'niy vozdukhokhladytel novoho typu. *Kholodylnaya tekhnika*. 1976. No. 3. P. 12–17.

17. World Bank Climate Change Knowledge Portal. URL: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>

18. Demianenko Yu. I., Doroshenko O. V., Hohol M. I. Systema kondytsiuvannya povitria na osnovi vyparnoho okholodzhennia i vidkrytoho absorbtsiinoho tsykladu. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2020. No. 1–2. P. 11–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1824>.

19. Lahnizi A., Mahdaoui M., Abdellah A. B., Anoune K., Bakhouya M., Ezbakhe H. Performance Analysis and Optimal Parameters of a Direct Evaporative Pad Cooling System under the Climate Conditions of Morocco. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. No. 13. P. 100362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.11.013>.

20. Tilahun S. W. Feasibility and Economic Evaluation of Low-cost Evaporative Cooling System in Fruit and Vegetables Storage. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*. 2010. No. 10(8). DOI: <https://doi.org/10.4314/ajfand.v10i8.60885>.

21. Ndukwu M. C., Manuwa S. I. Review of Research and Application of Evaporative Cooling in Preservation of Fresh Agricultural Produce. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2014. No. 7(5). P. 85–102. DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20140705.010>.

22. Abohorlu Doğramacı P., Riffat S., Gan G., Aydın D. Experimental Study of the Potential of Eucalyptus Fibres for Evaporative Cooling. *Renewable Energy*. 2019. No. 131. P. 250–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.005>.
23. Uzair S., Naseem A., Khalid H. A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021. No. 122. Vol. 105140. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0735193321000348>.
24. Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering. *Sustainable Cooling Technology Heats Up*. 2023. URL: <https://wyss.harvard.edu/news/sustainable-cooling-technology-heats-up>.
25. Guanchao Lv, Xu Ji, Bianfeng Yang, Yingxu Chen, Haiyang Xu. Operating modes study of evaporative cooling-dehumidification air conditioning under different climatic conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2024. No. 243, Vol. 122597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122597>.
26. What is the payback time of adiabatic cooling? URL: <https://www.oxycom.com/blog-news/how-quickly-do-you-earn-back-the-costs-of-adiabatic-cooling>.
27. Systema vyparnoho okholodzhennia EVAP. URL: <https://www.hogslat.com.ua/systema-vyparnoho-okholodzhennya-evap>.
28. TOV «VADA». URL: <https://vada.ua/munters-panel-okholodzhennya-celdek-7090-15-1-2960610>.

УДК 697.9: 620.9: 621.565.9

І. Б. Рябова, канд. техн. наук, професор, Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор,
Т. В. Школьнікова, канд. техн. наук, доцент,
Г. В. Пономаренко, канд. техн. наук, доцент, Л. А. Гарєв, аспірант

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ

Системи кондиціювання сьогодні активно впроваджуються не лише у житлових та офісних приміщеннях, а й у сферах агропромислового виробництва, зберігання сільськогосподарської продукції, фармацевтичної, харчової та мікроелектронної промисловості. Як відомо, на частку охолодження припадає до 10 % світового споживання електроенергії, а у промислових регіонах цей показник може сягати 30 %. Пошук технологій, здатних забезпечити отримання охолодженого повітря з мінімальними енергетичними та екологічними витратами є актуальною задачею, рішення якої набуває особливого значення в умовах повномасштабного вторгнення і теперішнього стану електрогенеруючої системи. Серед енергоефективних технологій кондиціювання значне місце посідають системи, що використовують випарне охолодження та відновлювальні джерела енергії.

Порівняно з традиційними компресійними і абсорбційними холодильними машинами, альтернативні системи, що базуються на процесах випарного охолодження, відрізняються низьким енергоспоживанням, екологічною безпечністю, простотою кон-

струкції та можливістю інтеграції з відновлювальними джерелами енергії. Розглянуто класифікацію систем випарного охолодження – прямі, непрямі та комбіновані – та особливості їхнього застосування в агропромисловому секторі, тепличних комплексах і виробничих приміщеннях. Окреслено перспективи використання зрошуваних насадок та матеріалів із високими термогідродинамічними характеристиками для інтенсифікації процесів тепло- та масообміну.

Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на оптимізацію конструкцій елементів теплообміну, пошук якісних вітчизняних матеріалів, удосконалення систем керування мікрокліматом і розробку енергоефективних рішень для умов України. Використання випарного охолодження розглядається як один із найперспективніших напрямів розвитку систем кондиціонування повітря, що поєднує енергозбереження, екологічну сталість та технологічну ефективність.

Ключові слова: системи кондиціонування повітря, зрошувані насадки, випарне охолодження, термодинамічна ефективність, термогідродинамічні характеристики, інтенсифікація процесів тепло- та масообміну.

I. B. Riabova, Yu. A. Selikhov, T. V. Shkolnikova, H. V. Ponomarenko, L. A. Hariev

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ENERGY-EFFICIENT AIR CONDITIONING TECHNOLOGIES IN UKRAINE

Air-conditioning systems are increasingly implemented not only in residential and office buildings but also across agro-industrial facilities, agricultural product storage, and the pharmaceutical, food, and microelectronics industries. It is well known that cooling processes account for up to 10 % of global electricity consumption, and in industrial regions, this figure can reach 30 %. Therefore, developing technologies that can deliver cooled air with minimal energy and environmental costs is a critical task especially under full-scale invasion and the unstable state of the national power generation system. Among energy-efficient air-conditioning technologies, systems based on evaporative cooling and renewable energy sources play a significant role.

Compared to traditional vapor-compression and absorption refrigeration systems, evaporative cooling technologies offer low energy consumption, environmental safety, simple design, and the ability to integrate with renewable energy sources. This paper reviews the classification of evaporative cooling systems – direct, indirect, and combined – and examines their application in the agro-industrial sector, greenhouse complexes, and industrial buildings. The study also highlights the potential of irrigated packings and materials with high thermohydrodynamic performance to enhance heat and mass transfer processes.

Further research should focus on optimizing heat exchange element designs, developing high-quality domestic materials, improving microclimate control systems, and designing energy-efficient solutions suited to Ukraine's conditions. Evaporative cooling is considered one of the most promising directions in the development of air-conditioning technologies, combining energy savings, environmental sustainability, and technological effectiveness.

Keywords: air-conditioning systems, wetted media, evaporative cooling, thermodynamic efficiency, thermohydrodynamic characteristics, heat and mass transfer intensification.