

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.565

Практичні аспекти використання адіабатично-випарного охолодження конденсаторів та драйкулерів холодильних машин для підвищення їх енергоефективності

С. В. Книш¹✉, Ю. О. Желіба²¹⁻²Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹serge@leacond.od.uaORCID: ¹<https://orcid.org/0009-0008-4836-4512>; ²<https://orcid.org/0000-0001-9768-4792>

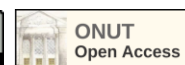
У статті розглянуто практичні аспекти використання адіабатично-випарного охолодження конденсаторів та драйкулерів як ефективного способу інтенсифікації тепловідведення у парокомпресійних холодильних машинах (ПКХМ). Проаналізовано принципи роботи систем адіабатично-випарного охолодження, їх конструктивні особливості та умови ефективного застосування в різних кліматичних умовах. Наведено класифікацію технічних рішень, що поєднують традиційне повітряне охолодження з адіабатичним або випарним зволоженням повітряного потоку, що дозволяє знизити температуру охолоджувального повітря до значень, близьких до температури вологого термометра. Робота має оглядовий характер і базується на узагальненні результатів сучасних наукових досліджень та практичному досвіді впровадження адіабатично-випарних систем охолодження у холодильній техніці. Проаналізовано вплив зниження температури конденсації на енергетичні показники ПКХМ, включаючи зменшення питомого енергоспоживання, підвищення холодопродуктивності та покращення сезонної енергоефективності. Виконано порівняльну оцінку основних технічних рішень (пряме зволоження теплообмінної поверхні, адіабатичне попереднє охолодження повітря, гібридні системи) за енергетичними та експлуатаційними показниками. Показано, що застосування адіабатично-випарного охолодження дозволяє знизити температуру конденсації на 5-15 °C залежно від типу системи та кліматичних умов, що забезпечує зменшення споживаної потужності компресора на 8-35 % та підвищення миттєвого холодильного коефіцієнта на 10-30 %. Найбільший ефект спостерігається у періоди пікових сезонних теплових навантажень, коли висока температура навколишнього повітря зумовлює підвищення температури конденсації та водночас зростає потреба в холодопродуктивності. Розглянуто експлуатаційні обмеження таких систем, зокрема вимоги до якості води, ризики корозії та накопу, необхідність оптимального керування режимами роботи. Отримані узагальнення можуть бути використані під час проєктування енергоефективних ПКХМ та модернізації промислових холодильних установок.

Ключові слова: Парокомпресійна холодильна машина; Конденсатор; Драйкулер; Адіабатично-випарне охолодження; Холодильний коефіцієнт; Енергоефективність.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3466>

© The Author(s) 2026. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Парокомпресійні холодильні машини (ПКХМ) із повітряним тепловідведенням (повітряні кон-

денсатори) та/або з проміжним контуром із драйкулером (dry cooler) широко застосовуються в комерційному та промисловому холоді, системах кондиціювання та технологічному охолодженні

завдяки простоті монтажу, відсутності потреби у воді та градієнтах і, відповідно, нижчим вимогам до водопідготовки та сервісу. Разом з тим, енергетичні показники таких рішень істотно залежать від температури та вологості зовнішнього повітря. Підвищення температури повітря на вході до конденсатора/драйкулера підвищує температуру (тиск) конденсації, та, як наслідок, зростає питома потужність компресора. У реальних умовах літніх температур це проявляється в зниженні холодопродуктивності, холодильного коефіцієнта, зростанні пікових електричних навантажень та, для частини обладнання, у наближенні до меж використання за тиском нагнітання або температурою нагнітання (з ризиком аварійних зупинок).

Одним із практично привабливих напрямів підвищення ефективності повітряного тепловідведення є класичне адіабатично-випарне охолодження повітря перед теплообмінною поверхнею або безпосереднє зволоження/зрошення (спрей, туман, змочувальні пакети/панелі). Фізично ефект зводиться до наближення температури повітря, що обдуває поверхню теплообмінника, до температури вологого термометра. Це дає змогу збільшити середню рушійну різницю температур у конденсаторі/драйкулері та знизити температуру конденсації при тих самих витратах повітря (а інколи і знизити цю витрату). У періодичній інженерній літературі такі рішення описуються як *mist pre-cooling*, *spray cooling*, *adiabatic pre-cooling*, *dry-and-adiabatic fluid cooler* тощо. Накопичений практичний досвід експлуатації систем кондиціонування показує, що туманоутворення перед повітряним конденсатором у поєднанні з якісним керуванням температурою конденсації можуть забезпечувати помітне зниження річного електроспоживання [1]. Приклад модельного дослідження показав близько 18 % економії електроенергії [1]. Для «сухих та адіабатичних» драйкулерів експериментально підтверджено суттєве покращення тепловідведення в умовах високої температури й помірної/низької відносної вологості. Зокрема, наведено приклади помітного з енергетичної точки зору зниження температури охолоджуваної рідини порівняно з «сухим» режимом [2]. Для систем з розпиленням води на конденсаторі повітроохолоджуваного чилера експериментально отримано підвищення холодильного коефіцієнта на рівні кількох відсотків (типово 4-8 %) і економію електроенергії в діапазоні 2,37-13,53 % залежно від режиму та способу керування зрошенням [3]. Для спліт-систем кондиціонування

також демонструється позитивний ефект спреї-охолодження конденсатора, включно з експериментально зафіксованим підвищенням холодильного коефіцієнта [4].

Окремо актуалізуються питання застосування адіабатичного попереднього охолодження повітря в умовах спекотного та вологого клімату, де потенціал адіабатично-випарного охолодження обмежується високою відносною вологістю. Проте, використання коректно спроектованих комбінацій змочувальних елементів і генераторів туману також може бути ефективним [5].

Попри значну кількість робіт, присвячених окресленому вище питанню, результати часто подані фрагментарно: різняться типи обладнання (ПКХМ зі спліт-конденсатором, повітряні чилери, системи з проміжним контуром і драйкулером), способи реалізації адіабатично-випарного охолодження (зволжувальні касети, туман високого тиску, ультразвуковий туман, спрей-форсунки), критерії оцінювання (миттєвий холодильний коефіцієнт, сезонна ефективність, електроспоживання за охолоджувальний сезон, питомі витрати води), а також умови експлуатації (клімат, якість води, режими теплового навантаження, вимоги до надійності та санітарії). Не має довіри і до усереднених для кліматичних умов рекомендацій від виробників подібних систем. Адже мета виробників систем більше продавати обладнання власного виробництва не завжди відповідає глобальним задачам енергоефективності та зниження впливу на навколишнє середовище. Це ускладнює перенесення окремих теоретичних та експериментальних висновків у практику проектування та модернізації холодильних систем.

Автором цієї статті у попередньому експериментальному дослідженні [6] було оцінено ефект від впровадження системи адіабатичного охолодження повітря драйкулерів у кліматичних умовах Одеської області. Результати, отримані на реальному обладнанні, підтвердили досягнення економії електроенергії на рівні, що корелює з наведеними вище діапазонами для помірного клімату, та виявили низку експлуатаційних нюансів. Це обґрунтовує необхідність узагальнення накопичених даних у вигляді огляду, що враховує як світовий досвід, так і локальні особливості експлуатації ПКХМ.

Метою цієї оглядової роботи є систематизація сучасних підходів до адіабатично-випарного охолодження повітряних конденсаторів і драйкулерів ПКХМ, узагальнення опублікованих діапазонів

можливого енергетичного зиску, а також критичний аналіз технічних та експлуатаційних обмежень (кліматична доцільність, водоспоживання, ризику корозії/накипу, вимоги до обслуговування і керування). Огляд зорієнтовано на формування практичних висновків щодо областей найбільшої ефективності та умов, за яких адіабатично-випарне охолодження може бути обґрунтованим як рішення для модернізації існуючих систем, або як елемент нових систем.

2. Термодинамічні передумови підвищення ефективності ПКХМ при використанні адіабатично-випарного охолодження конденсаторів та драйкулерів

Енергетична ефективність ПКХМ визначається сезонним холодильним коефіцієнтом. У ПКХМ підвищення температури конденсації викликає збільшення ступеня стиску компресора, що супроводжується зростанням питомої роботи стиску та споживаної електричної потужності, а також зниженням питомої холодопродуктивності робочої речовини.

Аналітичні та експериментальні дослідження сучасних холодильних систем показують, що зниження температури конденсації на 1 °C може зменшувати споживану потужність компресора приблизно на 2-4 %, залежно від типу холодоагенту та режиму роботи установки [7]. Це пояснюється високою чутливістю питомої холодопродуктивності робочої речовини та потужності компресора до тиску конденсації, оскільки робота стиску визначається співвідношенням тисків нагнітання та всмоктування.

Із підвищенням температури зовнішнього повітря підвищується і температура конденсації, що особливо критично для повітряних конденсаторів у літній період. У таких умовах зростає температура нагнітання, погіршуються умови змащення компресора та знижується моторесурс обладнання. Отже, зниження температури середовища, яке охолоджує конденсатор, є одним із найбільш ефективних способів як підвищення холодильного коефіцієнта ПКХМ, так і підвищення надійності роботи ПКХМ.

Процес випарного охолодження ґрунтується на термодинамічних закономірностях стану вологого повітря та явищі адіабатичного випаровування води. Основними параметрами, що визначають ефективність процесу, є температура повітря за сухим

термометром T_{dry} та температура вологого термометра T_{wet} .

У процесі адіабатного охолодження частина теплоти повітря витрачається на випаровування води, внаслідок чого температура повітря знижується за майже сталої ентальпії. Фактично, коли 1 кг води випаровується за 1 годину, вона поглинає ~700 Вт від навколишнього повітря. На психрометричній діаграмі цей процес відбувається вздовж лінії сталої температури вологого термометра, яка близька до ліній сталих ентальпій.

Теоретичною межею охолодження є температура вологого термометра вхідного повітря. Існуючі системи адіабатично-випарного охолодження працюють з ефективністю 70-90 % від теоретично можливого ступеню охолодження залежно від конструкції зволожувального пристрою, швидкості повітря та характеристик теплообмінної поверхні [2]. Коли випаровування води запускається за допомогою пристрою, який споживає невелику кількість енергії, цей пристрій випарного охолодження стає екологічнішим, ніж еквівалентне традиційне охолоджувальне обладнання, як то сухий кулер або чилер. Наприклад, є такі продукти, як *humiFog*, які споживають лише 5 Вт на л/год розбризкуваної води, щоб створити близько 700 Вт охолодження: співвідношення потужність охолодження / споживана потужність дорівнює 140:1. Використання адіабатичного зволоження перед повітряним конденсатором дозволяє істотно знизити температуру повітря, що обдуває теплообмінник, і, відповідно, зменшити температуру конденсації холодоагенту.

Чим нижча відносна вологість повітря, тим більша різниця між температурами за сухим та вологим термометрами та тим ефективніше відбувається процес випарного охолодження. Тому найбільший енергетичний ефект досягається у жарких і сухих кліматичних умовах, тоді як у регіонах із високою відносною вологістю потенціал випарного охолодження обмежений економічною доцільністю з причини малої різниці між значеннями температур за сухим та вологим термометрами [5].

Дослідження показують, що застосування випарного охолодження конденсаторів повітряних холодильних машин дозволяє знизити температуру конденсації на 5-12 °C, що забезпечує підвищення сезонної енергоефективності систем кондиціонування на величину до 10-30 % [1, 3, 4]. Отже, використання випарного охолодження є термодинамічно обґрунтованим методом підвищення ефек-

тивності ПКХМ.

За допомогою психрометричної діаграми повітря (рис. 1) можна кількісно визначити мінімальну кількість води, необхідну для охолодження повітря до температури вологого термометра [8]. Рис. 1 також показує, що чим «сухіше початкове повітря», тобто, чим нижче вологовміст (точка В), тим нижчою може бути температура вологого термометра.

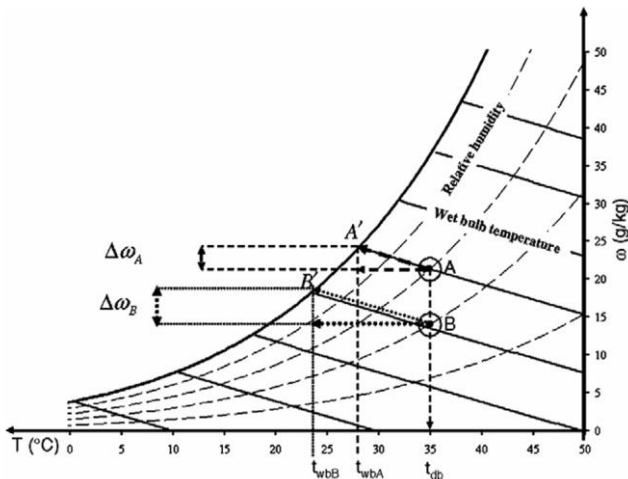


Рисунок 1 – Схематичне зображення впливу розпилення води у повітря на зміну його температури та вологовмісту [8]

3. Класифікація технічних рішень

Зараз у науковій літературі та на практиці розглядаються сучасні підходи до зниження температури конденсації ПКХМ, які базуються на використанні різних схем адиабатично-випарного охолодження повітряних теплообмінників. Вибір технічного рішення визначається кліматичними умовами, вимогами до водоспоживання, експлуатаційною надійністю, вартістю обладнання та конструктивними особливостями ПКХМ. На основі аналізу сучасних досліджень виділяють три основні групи систем [1-3]:

- безпосереднє зволоження теплообмінної поверхні;
- адиабатичне попереднє охолодження повітря перед теплообмінною поверхнею;
- гібридні системи.

3.1 Системи прямого зволоження теплообмінної поверхні

У системах прямого зволоження вода безпосередньо подається на поверхню теплообмінника (рис. 2) або розпилюється у повітряному потоці перед ним [9]. Випаровування води відбувається

безпосередньо на трубках та ребрах конденсатора, що інтенсифікує теплообмін і знижує температуру стінки теплообмінника.

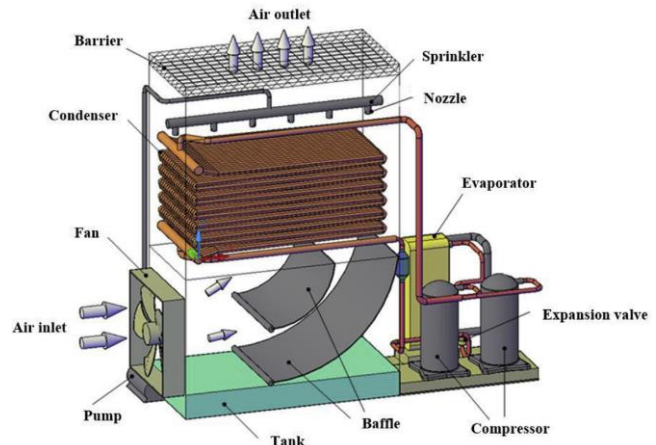


Рисунок 2 – Система з прямим зволоженням поверхні конденсатора [9]

Основними перевагами такого підходу є:

- максимальне зниження температури конденсації;
- відносна простота модернізації існуючих повітряних конденсаторів;
- високий коефіцієнт тепловіддачі завдяки змочуванню поверхні.

Експериментальні дослідження показують можливість зниження температури конденсації на 8-12 °C і підвищення холодильного коефіцієнта на величину до 25 % у періоди сезонних високих температур навколишнього середовища [1]. Водночас прямий контакт води з теплообмінником створює експлуатаційні ризики: більш інтенсивну корозію, утворення накипу та необхідність водопідготовки.

3.2 Адиабатичне попереднє зволоження повітря перед теплообмінниками

Адиабатичне попереднє охолодження є непрямим методом випарного охолодження [10]. Одним з варіантів є встановлення перед повітряним конденсатором зволожувальних касет, через які проходить повітряний потік (рис. 3). Вода випаровується в цих касетах, знижуючи температуру повітря за сухим термометром до значень, близьких до температури вологого термометра.

Зрошувальні панелі чи касети менш ефективні чим розпилення, до того ж додають додатковий опір потоку повітря.

Ще одним варіантом, який буде також розглянутий далі, є встановлення перед теплообмінником

форсунок, які розпилюють воду таким чином, щоб вона випаровувалася у повітря ще до досягнення поверхні теплообміну.

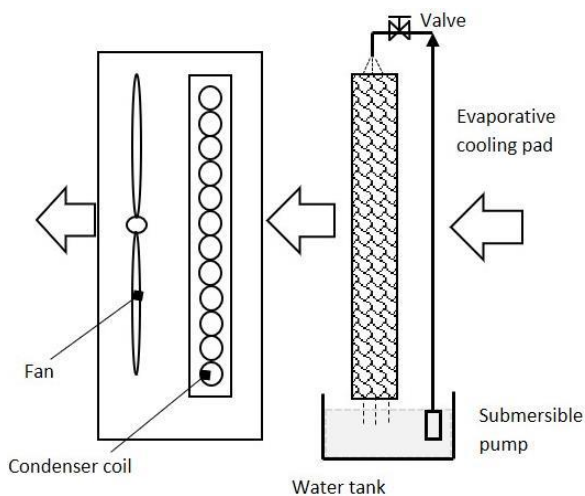


Рисунок 3 – Схематичне відображення поєднання випарних охолоджувачів з конденсатором холодильної машини [10]

Основні переваги методу:

- відсутність прямого контакту води з теплообмінником;
- зменшення корозійних процесів;
- стабільні експлуатаційні характеристики.

Розпилення – самий ефективний спосіб випаровування. Поверхня випаровування 1-го літра води становить близько 600 м² (прямокутник 20х30 м), за розміру капель 0,01 мм проходить майже миттєве випаровування.

Адіабатичні системи дозволяють знизити температуру повітря на 5-10 °С залежно від психрометричних умов (температури за сухим термометром та відносної вологості), що призводить до істотного зменшення споживаної потужності компресором ПКХМ [2]. Такі рішення особливо ефективні під час модернізації існуючих холодильних систем, оскільки не потребують значної зміни конструкції конденсатора, зупинки холодильних систем для техпереоснащення.

Недоліком є дещо менша інтенсивність охолодження порівняно з прямим зволоженням, а також залежність ефективності від відносної вологості зовнішнього повітря.

3.3 Гібридні системи адіабатично-випарного охолодження

Гібридні системи поєднують сухе та випарне охолодження в межах одного теплообмінника. У звичайних умовах система працює як традиційний

сухий охолоджувач, а при підвищенні температури навколишнього середовища активується адіабатичний режим (у автоматичному або ручному режимі).

Основні особливості:

- мінімальне водоспоживання;
- адаптивна робота залежно від клімату;
- підвищений сезонний коефіцієнт енергоефективності.

Такі системи забезпечують оптимальний баланс між енергоспоживанням і використанням води, що робить їх перспективними для регіонів із змінним кліматом. Дослідження показують, що сезонна економія електроенергії може становити 15-30 % при значно меншому водоспоживанні порівняно з системами адіабатно-випарного охолодження теплообмінників, які працюють постійно [11]. Виробники таких систем налаштовують системи керування на включення адіабатичного режиму вже за температури навколишнього середовища 25-28 °С. Переналаштування параметрів керування в залежності від кліматичних умов експлуатації та особливостей ПКХМ перекладається на сервісних інженерів. Проте практика показує, що його не проводять, адже не розуміють енергетичних та економічних характеристик процесу.

4. Аналіз отриманих у літературі результатів

У роботі [2] наведено модель та експериментальне порівняння ефективності роботи чилерів з сухим та адіабатично-випарним охолодженням конденсатора. Враховувався вплив температури та відносної вологості навколишнього повітря на температуру охолодженої у чилері води. У роботі [2] зафіксовано зниження температури охолодженої чилером води на 7,5 °С при застосуванні адіабатного зволоження повітря перед конденсатором у порівнянні з «сухою» системою (температура навколишнього повітря 30 °С, відносна вологості 50 %).

Експериментальне дослідження [2] показало, що коефіцієнт теплопередачі зростає зі збільшенням швидкості повітря через зовнішню частину теплообмінника (драйкулера) та зі збільшенням швидкості води всередині, що є очікуваним результатом. Однак, також показано зменшення ефективності секції теплообмінника з адіабатно-випарним охолодженням зі збільшенням швидкості потоку повітря крізь неї. Цей ефект пояснюється тим, що збільшення швидкості потоку повітря зменшує час контакту повітря з водою, що приз-

водить до меншої ефективності випарного охолодження повітря.

У роботі [12] проаналізовано підвищення енергетичної ефективності холодильної системи за рахунок використання водяного розпилювача перед конденсатором. Схема експериментальної установки наведена на рис. 4. У роботі було проведене не тільки експериментальне, а й емпіричне дослідження покращення ефективності. Систему розпилення води було впроваджено у працюючу систему кондиціонування (холодильна машина – тепловий насос), режими роботи якої було досліджено у режимі охолодження. При цьому була залишена власна існуюча система керування. Додатково були виміряні дані температури та тиску конденсації холодоагенту, температури та вологості повітря перед та після конденсатора.

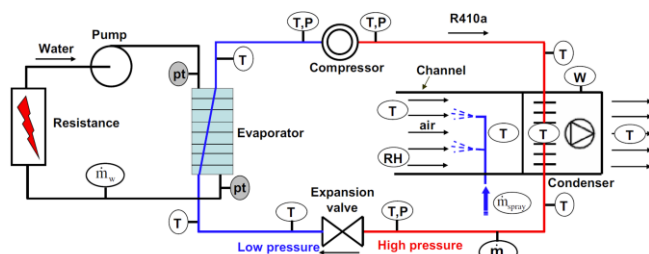


Рисунок 4 – Схема експериментальної установки для теплового насоса з розпиленням води перед конденсатором [12]

Як результат упровадження системи розпилення води було отримане підвищення холодильного коефіцієнта на 22,4 % на основі вимірювань кількості відведеної у випарнику теплоти, електроспоживання компресором, вентиляторами та живильним насосом системи розпилення води. Значення може бути навіть вищим і досягати 28,9 % без урахування витрат на електроенергію насоса за умов відносно спекотного та сухого повітря (відносна вологість 19,7 % та температура 308 K). Зменшення споживання електроенергії холодильною машиною склало 7-16,7 %. Також у роботі було розроблено метод, який враховує теплообмін між холодоагентом у багатоходовому конденсаторі та повітрям із краплями води. Це дозволило знайти оптимальну швидкість розпилення та тиск на вході сопла, щоб досягти максимального покращення теплообміну без надмірної витрати води.

У роботі [13] представлено експериментальні та теоретичні дослідження ефективності охолодження за рахунок розпилювання води перед конденсаторами для покращення холодильного кое-

фіцієнта чилера. Чилер мав потужність 282 кВт та холодильний коефіцієнт 2,8 у номінальному режимі. Він працював із системою розпилення води в двох режимах: звичайне регулювання тиску з фіксованою заданою температурою конденсації (номінальний режим) та регулювання швидкості вентиляторів конденсатора з регульованою температурою конденсації (режим частотного регулювання). Дослідження проводилося протягом 7 місяців у широкому інтервалі робочих параметрів та параметрів навколишнього середовища. Аналіз зібраних даних показав, що зміна ефективності охолодження залежала, головним чином, від температури повітря по вологому термометру, тобто від кліматичних умов, а не від режимних параметрів роботи холодильної системи. Дослідження впливу різного ступеня розпилення крапель у повітря показало, що фактична ефективність охолодження повітря може бути як вищою, так і нижчою за відповідні теоретичні прогнози. Відхилення було викликано або надлишком туману, що виноситься через теплообмінну поверхню за конденсатор, або унесенням туману потоком повітря без потрапляння на теплообмінну поверхню. Використання теоретичного прогнозування ефективності охолодження може призвести до переоцінки або недооцінки покращення холодильного коефіцієнта ПКХМ. Через різні комбінації погодних умов та різні навантаження холодильної системи, спостерігалися різні діапазони ефективності охолодження повітря для заданої холодопродуктивності. Підвищення холодильного коефіцієнта у випадку застосування попереднього охолодження повітря перед конденсатором туманом становило 0,36-8,86 % у нормальному режимі та 0,34-10,19 % у режимі застосування роботи вентиляторів зі змінною швидкістю.

В оглядовій роботі [7] розглянуто декілька різних систем, включаючи систему з конденсатором, зрошуваним водою (конденсатор з прямим зволоженням теплообмінної поверхні), відповідно до схеми, зображеної на рис. 5. У роботі було показано, що використовуючи такий конденсатор замість повітряного охолодження, споживання енергії системами з холодопродуктивністю від 3 до 3000 кВт можна зменшити на 15-58 %, а холодильний коефіцієнт можна покращити на 14,3-113,4 %, залежно від кліматичних умов та режимів роботи.

У роботі [14] було проаналізоване питання використання випарного охолодження прямого та непрямого типу, а також можливості впроваджен-

ня ПКХМ із конденсаторами з адіабатично-випарним охолодженням для виробництва штучного холоду в центрах обробки даних. Показано, що випарне охолодження в центрах обробки даних може скоротити їх загальне енергоспоживання на величину до 11,3 % у частці електроспоживання для цілей охолодження. Також показано, що в порівнянні з чилерами, у яких конденсатори охолоджуються водою, чилери з адіабатно-випарним охолодженням конденсаторів можуть зекономити до 29,5 % енергії.

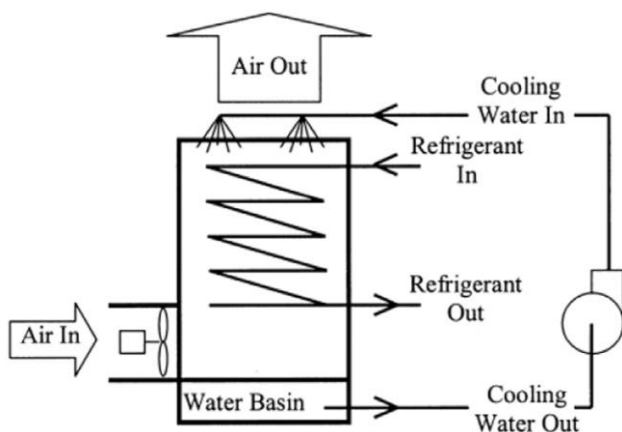


Рисунок 5 – Схематичне зображення конденсатор з прямим зволоженням теплообмінної поверхні [7]

У роботі [8] розглядається холодильна машина з конденсатором, перед яким встановлена система форсунок для розпилення – рис. 6.

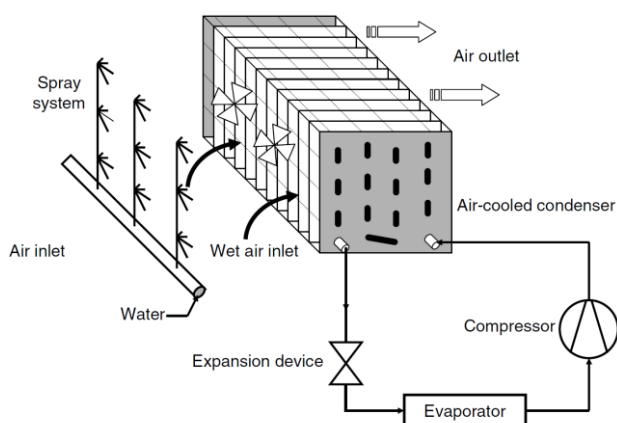


Рисунок 6 – Схематичне зображення розпилювання води перед конденсатором [8]

У роботі показано збільшення холодопродуктивності та відведеної теплоти конденсації за рахунок розпилення води перед конденсатором, які лінійно зростають до максимальних значень 7 % та 13 %, відповідно.

Для холодильної системи, оснащеної конденса-

тором із повітряним охолодженням, розпилення води представляє значну цінність як проста та надійна технологія. У розглянутому прикладі покращення холодильного коефіцієнта досягало 55 % [8].

Також інтерес представляє вивчення ступеня зволоження поверхні теплообміну конденсатора на підвищення ефективності ПКХМ. Якщо повітря перенасичене водою, то вона почне стікати з трубок та ребер, не впливаючи на покращення інтенсивності теплообміну. В той же час витрати води можуть бути значними, що призведе до додаткових економічних витрат. У роботі [8] показано, що доцільно визначати оптимальні значення витрати розпиленої води, яка залежать від багатьох параметрів (конструкції конденсатора, швидкості повітря, температури конденсації, параметрів повітря тощо).

У роботі [3] також досліджувалася ефективність роботи системи розпилення води перед конденсатором холодильної системи. Для розпилення використовувалися перспективні двофазні вихрові форсунок для газо-рідинних систем, розроблені авторами, які характеризуються високою якістю розпилення та низьким енергоспоживанням. Було показано, що впровадження такої системи охолодження повітря перед конденсаторами сприяє економії електроенергії, що споживається чилерами, у кількості 2,37-13,53 %.

У роботі [11] аналізувалася система адіабатично-випарного охолодження, яка наведена на рис. 3. Додатково розглядалися різні холодоагенти та вплив їх властивостей на холодильний коефіцієнт системи. Також аналізувався вплив кліматичних умов (21 варіант географічного розташування системи) на ефективність роботи холодильної системи. Усі кліматичні зони, вивчені в цьому дослідженні, отримували вигоду від упровадження технології зі зволоженням повітря перед конденсатором, однак ефект для них різний. Для найгіршого варіанту скорочення річного споживання енергії щонайменше на 5 %. А зони з жарким посушливим кліматом отримують найбільшу вигоду від упровадження таких систем, де споживання енергії зменшується приблизно на 20% порівняно з системами без зволоження повітря перед конденсаторами. Крім того, показано, що існують також можливості для енергозбереження в районах з тропічним та помірним кліматом із сухим літом.

Також додатково вивчався вплив витрати води на зволоження повітря перед конденсатором на ефективність роботи холодильної машини. Отри-

мано, що для 1 кВт·год зекономленої електроенергії витрата води у випарному обладнанні складає в середньому 21 л.

У роботі [10] також було проведено дослідження впливу впровадження адіабатного зволоження повітря перед конденсаторами кондиціонера відповідно схемі, аналогічній наведеній на рис. 3. У цій роботі було показано, що роботу компресора можна зменшити приблизно на 6,57 % порівняно з кондиціонером без випарного охолодження. Крім того, холодильний коефіцієнт підвищувався на 12,95 % при найвищій витраті води.

5. Експлуатаційні та технічні аспекти

Незважаючи на дуже привабливі результати з точки зору енергозбереження, впровадження систем на основі адіабатично-випарного охолодження повітря перед конденсаторами та драйкулерами ПКХМ має свої особливості та труднощі під час експлуатації. Ефективність таких систем визначається не лише термодинамічними факторами, але й низкою інженерних, екологічних та економічних обмежень, які необхідно враховувати на етапах проектування та модернізації.

Випарне охолодження перед теплообмінною поверхнею призводить до періодичного зволоження металевих поверхонь, що істотно підвищує ризики корозії та відкладення мінеральних солей (накипу). Цикли зміни “сухого/вологого” режиму сприяють утворенню електрохімічних пар і локальній корозії ребер із алюмінію та сталевих компонентів, особливо за наявності домішок у воді [15]. Осідання мінеральних відкладень на ребрах знижує коефіцієнт теплопередачі та збільшує аеродинамічний опір, що з часом нівелює енергетичний вигравш від застосування зволоження. У системах із рециркуляцією води високі концентрації органіки сприяють утворенню біоплівки, які додатково блокують теплообмін і створюють санітарні ризики (зокрема, легіонельоз) [16]. Для мінімізації біологічного обростання доцільно передбачати періодичну дезінфекцію системи та обмежувати використання рециркуляційних схем у регіонах зі спекотним вологим кліматом.

Ключові параметри води для випарного охолодження включають: жорсткість, загальну мінералізацію, рН, вміст хлоридів та відсутність колоїдних домішок. Жорстка вода прискорює відкладення карбонатів на поверхнях теплообмінника, що знижує рушійну силу теплопередачі. Для зниження

цих ефектів рекомендується використання пом'якшеної або демінералізованої води. У разі використання води з водопровідної мережі необхідним є встановлення систем фільтрації (картриджні фільтри, системи зворотного осмосу) та регулярний моніторинг її якості. Особливу увагу слід приділяти контролю вмісту хлоридів, які навіть у невеликих концентраціях ініціюють пітингову корозію алюмінієвих ребер та мідних трубок.

Періодичне змочування ребер і корпусів конденсатора та драйкулера значно прискорює деградацію захисних покриттів та металевих поверхонь порівняно з «сухими» режимами. Використання стійких сплавів (наприклад, алюміній з антикорозійним покриттям або нержавіюча сталь для несучих конструкцій), антикорозійних покриттів (епоксидні, полімерні) і регулярний сервіс знижують ці ризики, але не усувають їх повністю. Досвід експлуатації показує, що за відсутності належної водопідготовки термін служби теплообмінників у системах із прямим зволоженням може скорочуватися на 30-50 % порівняно з традиційними сухими конденсаторами.

Ефективність застосування адіабатично-випарного охолодження конденсаторів та драйкулерів ПКХМ істотно залежить від логіки автоматизованого керування роботою систем зволоження. Оптимальні алгоритми включають:

- увімкнення випарного режиму лише при високій температурі повітря за сухим термометром та помірній вологості;
- регулювання подачі води залежно від режимних параметрів ПКХМ (температури конденсації, тиску нагнітання) та параметрів повітря;
- захист від роботи у несприятливих або недоцільних режимах (низькі температури, висока відносна вологість повітря).

Адаптивні алгоритми на основі контролю температури за сухим та вологим термометрами дозволяють мінімізувати витрати води при збереженні позитивного ефекту енергозбереження [5]. Сучасні системи керування все частіше інтегрують погодинне прогнозування змін кліматичних умов (на основі IoT-датчиків) та предиктивне обслуговування, що дозволяє своєчасно виявляти зниження ефективності через накип або корозію. Важливим аспектом є також економічна оцінка доцільності застосування адіабатичного зволоження: для різних регіонів необхідно враховувати вартість води, витрати на водопідготовку та утилізацію стоків, особливо в умовах дефіциту водних ресур-

сів. За даними [11], питома витрата води на 1 кВт·год зекономленої електроенергії може становити від 15 до 25 літрів, що в регіонах з високою вартістю водопостачання може знижувати загальну економічну ефективність заходу.

6. Порівняльна оцінка технічних рішень адіабатично-випарного охолодження конденсаторів та драйкулерів

Для узагальнення розглянутих технічних підходів доцільно виконати порівняння основних розглянутих технічних рішень за енергетичними та експлуатаційними показниками. У таблиці наведе-

дено узагальнені діапазони параметрів, отримані на основі сучасних експериментальних і оглядових досліджень [1-10]. Значення мають типовий інженерний характер і можуть змінюватися залежно від клімату, конструкції холодильної системи та режиму її експлуатації.

Наведені дані демонструють, що класичний повітряний конденсатор має найпростішу конструкцію, проте характеризується найгіршими енергетичними показниками через високу температуру конденсації в умовах високої температури навколишнього повітря. Саме тому велика кількість сучасних досліджень спрямована на інтенсифікацію теплообміну в таких системах [1-7].

Таблиця – Порівняння систем охолодження конденсаторів ПКХМ

Параметр	Повітряний «сухий» конденсатор (базовий)	Адіабатично-випарне зволоження теплообмінної поверхні	Адіабатичне зволоження повітря перед теплообмінною поверхнею	Гібридна система
Принцип роботи	Сухе повітряне охолодження	Розпил води на теплообмінник	Попереднє адіабатичне охолодження повітря	Комбінований сухий/адіабатичний режим
Середнє зниження температури конденсації, °C	0	8-12	5-10	6-12 (сезонно)
Середнє підвищення холодильного коефіцієнту, %	-	15-25	10-20	15-30
Середнє зменшення споживаної компресором потужності, %	-	10-20	8-15	12-25
Водоспоживання	відсутнє	високе	середнє	низьке
Ризик корозії/накипу	низький	високий	низький	низький
Складність обслуговування	низька	середня	середня	середня
Початкові інвестиції	низькі	низькі - середні	середні	середні - високі
Сезонна енергоефективність	базова	висока	висока	дуже висока

Системи на основі адіабатично-випарного зволоження теплообмінної поверхні забезпечують значне підвищення холодильного коефіцієнта ПКХМ завдяки зниженню температури конденсації при безпосередньому випаровуванні води на поверхні теплообмінника. Однак їх широке застосування обмежується експлуатаційними проблемами – необхідністю водопідготовки та підвищеним ризиком деградації теплообмінника. Зазвичай таке рішення перетворює повітряні конденсатори у випарні, які мають зовсім інші конструктивні особливості.

Системи на основі адіабатичного зволоження повітря перед теплообмінною поверхнею демонструють більш збалансовані характеристики. Хоча їх ефективність дещо нижча, відсутність прямого

контакту води з металевими поверхнями істотно підвищує довговічність системи. Саме цей підхід зараз активно застосовується у комерційних холодильних системах та системах кондиціонування повітря.

Гібридні системи показують найкращі сезонні результати. Завдяки роботі в сухому режимі більшу частину року водоспоживання суттєво зменшується, а адіабатичний режим активується лише при високих температурах зовнішнього повітря. Це дозволяє досягти оптимального балансу між енергозбереженням і використанням водних ресурсів [4, 5].

Порівняльний аналіз підтверджує, що подальший розвиток енергоефективних ПКХМ пов'язаний із переходом від традиційних сухих систем до

адаптивних адіабатичних і гібридних схем. Найбільш перспективним напрямом є інтеграція гібридних систем із інтелектуальними алгоритмами керування, що враховують регіональні та локальні кліматичні умови та змінні параметри експлуатації ПКХМ у режимі реального часу.

7. Висновки

У результаті проведеного огляду сучасних наукових досліджень і технічних рішень використання адіабатично-випарного охолодження конденсаторів і драйкулерів парокompресійних холодильних машин (ПКХМ), підтверджено значний потенціал цього підходу для підвищення енергоефективності систем холодопостачання та кондиціювання повітря.

Аналіз експериментальних і аналітичних досліджень показує, що застосування адіабатично-випарного охолодження дозволяє знизити температуру конденсації на 5-15 °C залежно від типу системи та кліматичних умов. Це забезпечує зменшення споживаної потужності компресора на 8-35 % і підвищення миттєвого холодильного коефіцієнта у середньому на 10-30 %. Найбільший ефект спостерігається у періоди пікових сезонних теплових навантажень, коли висока температура навколишнього повітря визначає робочі параметри холодильної машини.

Ефективність адіабатично-випарного охолодження визначається різницею між температурою повітря за сухим та вологим термометрами, тому максимальний енергетичний ефект досягається в регіонах із жарким і сухим або помірно континентальним кліматом. У таких умовах значна психрометрична різниця забезпечує суттєве зниження температури повітря перед теплообмінником при його зволоженні. У регіонах із високою відносною вологістю потенціал адіабатично-випарного охолодження зменшується, проте навіть там адіабатичні системи можуть забезпечувати сезонне підвищення ефективності за рахунок роботи в перехідні періоди року. Отже, найбільш доцільним є застосування гібридних схем, здатних змінювати режим роботи залежно від кліматичних умов.

Попри енергетичні переваги, впровадження систем адіабатично-випарного охолодження конденсаторів та драйкулерів ПКХМ пов'язане з рядом технічних обмежень. До них належать підвищені вимоги до якості води, ризик утворення накипу та корозії, необхідність регулярного технічного об-

слуговування, а також залежність ефективності роботи цих систем від температури та відносної вологості зовнішнього повітря. Додатковими факторами є водоспоживання та потреба в оптимальному балансі між економією електроенергії та використанням водних ресурсів. Відсутність стандартизованих методик оцінювання ефективності та обмежена кількість довгострокових експлуатаційних даних також залишаються стримувальними чинниками широкого впровадження таких систем.

Таким чином, адіабатично-випарне охолодження повітряних конденсаторів і драйкулерів є перспективним напрямом підвищення енергоефективності ПКХМ, що потребує подальшого розвитку методів оптимального проєктування та керування з урахуванням реальних кліматичних і експлуатаційних умов.

Література

1. **Yu F. W., Chan K. T.** Improved energy performance of air-cooled chiller system with mist pre-cooling // *Applied Thermal Engineering*. – 2011. – Vol. 31, No. 4. – P. 537-544. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.012>.
2. **Lucas M., Martínez P., Cutillas C. G., Martínez P. J., Ruiz J., Kaiser A. S., Zamora B.** Experimental optimization of the thermal performance of a dry and adiabatic fluid cooler // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 69, No. 1-2. – P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.033>.
3. **Yang H., Rong L., Liu X., Liu L., Fan M., Pei N.** Experimental research on spray evaporative cooling system applied to air-cooled chiller condenser // *Energy Reports*. – 2020. – Vol. 6. – P. 906-913. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.04.001>.
4. **Charoensin-O-larn R., Kavee N., Klinbun J.** Experimental study on the influence of the water spray cooling on air-cooled condenser of the split-type air conditioner // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 61. – Article 104941. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104941>.
5. **Ahmed F., Ramana A. S., Jayakumar K.** Experimental study on adiabatic pre-cooling systems for air cooled condensers in hot and humid climates // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – Article 4933. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82863-0>.
6. **Книш С. В.** Експериментальна оцінка ефекту впровадження системи адіабатичного охолодження повітря драйкулерів холодильних установок у кліматичних умовах Одеської області // Холо-

дильна техніка та технологія. – 2025. – Т. 61, №. 4. – С. 312-318. <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3335>

7. Harby K., Gebaly D.R., Koura N.S., Hassan M.S. Performance improvement of vapor compression cooling systems using evaporative condenser: An overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 58. – P. 347-360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.313>.

8. Youbi-Idrissi M., Macchi-Tejeda H., Fournaison L., Guilpart J. Numerical model of sprayed air cooled condenser coupled to refrigerating system // Energy Conversion and Management. 2007. – Vol. 48, No. 7. – P. 1943-1951. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.007.01.025>.

9. Chien L.H., Xu J.J., Yang T.F., Yan W.M. Experimental study on water spray uniformity in an evaporative condenser of a water chiller // Case Studies in Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 15. P. 100512. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100512>.

10. Mainil R.I., Sulaiman A.W., Mainil A.K., Aziz A. Performance Enhancement of Split Air Conditioner During Evaporative Cooling Application // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2021. – Vol. 86, No. 2. – P. 147-156. <https://doi.org/10.37934/arfmts.86.2.147156>.

11. Jacob T.A., Shah N., Park W.Y. Evaluation of hybrid evaporative-vapor compression air conditioners for different global climates // Energy Conversion and Management. – 2021. – Vol. 249. – P. 114841.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114841>.

12. Tissot J., Boulet P., Trinquet F., Fournaison L., Lejeune M., Liaudet F. Improved energy performance of a refrigerating machine using water spray upstream of the condenser // International Journal of refrigeration. – 2014. – Vol. 38. – P. 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.08.025>.

13. Yu F.W., Ho W.T., Chan K.T., Sit R.K.Y. Theoretical and experimental analyses of mist precooling for an air-cooled chiller // Applied Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 130. – P. 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.046>.

14. Chu J., Huang X. Research status and development trends of evaporative cooling air-conditioning technology in data centers // Energy and Built Environment. – 2023. – Vol. 4. – P. 86-110. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.08.004>.

15. Li Z., Zhang H., Wang Y., Zhao Q. Corrosion behavior and mechanism of carbon steel in industrial circulating cooling water system operated by electrochemical descaling technology // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 434. – P. 139817. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139817>.

16. Wang H., Li Y., Yang H., Lin K.-A., Shao T. Biofilms Controlling in Industrial Cooling Water Systems: A Mini-Review of Strategies and Best Practices // ACS Applied Bio Materials. – 2023. – Vol. 6. – P. 3213-3220. <https://doi.org/10.1021/acsabm.3c00319>.

Отримана в редакції 18.02.2026, прийнята до друку 03.03.2026

Practical aspects of using adiabatic-evaporative cooling of condensers and dry coolers of refrigeration machines to improve their energy efficiency

Sergii Knysh^{1✉}, Yurii Zheliba²

^{1,2}Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹serge@leacond.od.ua

ORCID: ¹<https://orcid.org/0009-0008-4836-4512>; ²<https://orcid.org/0000-0001-9768-4792>

This article examines the practical aspects of using adiabatic-evaporative cooling of condensers and dry coolers as an effective method for intensifying heat rejection in vapor-compression refrigeration machines (VCRMs). The operating principles of adiabatic-evaporative cooling systems, their design features, and the conditions for their effective application in various climatic conditions are analyzed. A classification of technical solutions that combine traditional air cooling with adiabatic or evaporative humidification of the air flow is presented, which allows the cooling air temperature to be reduced to values close to the wet-bulb temperature. The work is of a review nature and is based on a synthesis of the results of recent scientific research and practical experience in the implementation of adiabatic-evaporative cooling systems in refrigeration engineering. The impact of lowering the condensation temperature on the energy performance indicators of VCRMs is analyzed, including reductions in specific energy consumption, increases in cooling capacity, and improvements in seasonal energy efficiency. A comparative assessment of the main technical solutions (direct wetting of the heat exchanger surface, ad-

adiabatic pre-cooling of air, hybrid systems) is performed in terms of energy and operational performance. It is shown that the application of adiabatic-evaporative cooling allows reducing the condensation temperature by 5-15 °C depending on the system type and climatic conditions, which provides a reduction in compressor power consumption of 8-35 % and an increase in the instantaneous coefficient of performance (COP) of 10-30 %. The greatest effect is observed during periods of peak seasonal thermal loads, when high ambient temperatures lead to an increase in the condensation temperature while simultaneously increasing the demand for cooling capacity. The operational limitations of such systems are considered, including water quality requirements, risks of corrosion and scaling, and the need for optimal control of operating modes. The findings can be used in the design of energy-efficient VCRMs and the modernization of industrial refrigeration installations.

Keywords: Vapor-compression refrigeration machine; Condenser; Dry cooler; Adiabatic-evaporative cooling; Coefficient of performance (COP); Energy efficiency.

References

1. Yu, F. W., Chan, K. T. (2011). Improved energy performance of air-cooled chiller system with mist pre-cooling. *Applied Thermal Engineering*, 31(4), 537-544.
2. Lucas, M., Martínez, P., Cutillas, C. G., Martínez, P. J., Ruiz, J., Kaiser, A. S., Zamora, B. (2014). Experimental optimization of the thermal performance of a dry and adiabatic fluid cooler. *Applied Thermal Engineering*, 69(1-2), 1-10.
3. Yang, H., Rong, L., Liu, X., Liu, L., Fan, M., Pei, N. (2020). Experimental research on spray evaporative cooling system applied to air-cooled chiller condenser. *Energy Reports*, 6, 906-913.
4. Charoensin-O-larn, R., Kavee, N., Klinbun, J. (2024). Experimental study on the influence of the water spray cooling on air-cooled condenser of the split-type air conditioner. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61, 104941.
5. Ahmed, F., Ramana, A. S., Jayakumar, K. (2025). Experimental study on adiabatic pre-cooling systems for air cooled condensers in hot and humid climates. *Scientific Reports*, 15, 4933.
6. Knysh, S. V. (2025). Experimental evaluation of the effect of adiabatic air cooling for dry coolers of chillers in the Odesa region climate. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(4), 312-318.
7. Harby, K., Gebaly, D.R., Koura, N.S., Hassan, M.S. (2016). Performance improvement of vapor compression cooling systems using evaporative condenser: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 347-360.
8. Youbi-Idrissi, M., Macchi-Tejeda, H., Fournaison, L., Guilpart, J. (2007). Numerical model of sprayed air cooled condenser coupled to refrigerating system. *Energy Conversion and Management*, 48(7), 1943-1951.
9. Chien, L.H., Xu, J.J., Yang, T.F., Yan, W.M. (2019). Experimental study on water spray uniformity in an evaporative condenser of a water chiller. *Case Studies in Thermal Engineering*, 15, 100512.
10. Mainil, R.I., Sulaiman, A.W., Mainil, A.K., Aziz, A. (2021). Performance Enhancement of Split Air Conditioner During Evaporative Cooling Application. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 86(2), 147-156.
11. Jacob, T.A., Shah, N., Park, W.Y. (2021). Evaluation of hybrid evaporative-vapor compression air conditioners for different global climates. *Energy Conversion and Management*, 249, 114841.
12. Tissot, J., Boulet, P., Trinquet, F., Fournaison, L., Lejeune, M., Liaudet, F. (2014). Improved energy performance of a refrigerating machine using water spray upstream of the condenser. *International Journal of refrigeration*, 38, 93-105.
13. Yu, F.W., Ho, W.T., Chan, K.T., Sit, R.K.Y. (2018). Theoretical and experimental analyses of mist precooling for an air-cooled chiller. *Applied Thermal Engineering*, 130, 112-119.
14. Chu, J., Huang, X. (2023). Research status and development trends of evaporative cooling air-conditioning technology in data centers. *Energy and Built Environment*, 4, 86-110.
15. Li, Z., Zhang, H., Wang, Y., Zhao, Q. (2024). Corrosion behavior and mechanism of carbon steel in industrial circulating cooling water system operated by electrochemical descaling technology. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139817.
16. Wang, H., Li, Y., Yang, H., Lin, K.-A., Shao, T. (2023). Biofilms Controlling in Industrial Cooling Water Systems: A Mini-Review of Strategies and Best Practices. *ACS Applied Bio Materials*, 6, 3213-3220.

Received 18 February 2026

Approved 03 March 2026

Available in Internet 31 March 2026