

УДК 628.165

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.2\(500\).22](https://doi.org/10.15589/znп2025.2(500).22)

PERFORMANCE INDICATORS OF DIFFERENT TYPES OF CONDENSERS IN THERMAL DESALINATION SYSTEMS

ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ТИПІВ КОНДЕНСАТОРІВ ТЕРМІЧНИХ ОПРІСНЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Volodymyr S. Sereda

sereda.volodymyr@lil.kpi.ua

ORCID: 0000-0002-4645-3123

Ihor V. Telychko

i.telychko@kpi.ua

ORCID: 0009-0001-9672-5182

В. В. Серeda,

канд. техн. наук, доцент

І. В. Теличко,

аспірант

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

Abstract. Purpose. The article addresses the critical issue of global freshwater scarcity caused by population growth, industrialization, and agricultural development. This issue is becoming increasingly acute each year, especially in arid regions with limited water resources. One solution is the implementation of desalination technologies suitable for small-scale and decentralized freshwater production.

Methodology. The focus is on studying a key component of thermal desalination units – the condenser. A classification of condenser types used in such systems is presented. The main performance indicators of condensers (condensation rate, mass flow ratio coefficient, and productivity) are described. Results of experimental studies of different condenser types are analyzed, identifying their advantages and disadvantages. The influence of air and saline water flow rates on the condensation rate is shown. A correlation between system productivity and the condenser’s heat exchange surface area is established. It is found that the condensation rate varies depending on design features and operating conditions. Optimal values of the mass flow ratio coefficient are identified, at which the maximum condensation rate is achieved. Key performance indicators for various types of condensers are provided.

Results. As a result, it is established that for small-scale thermal desalination systems, “tube-in-tube” or coil-type condenser designs are optimal. In contrast, finned-tube heat exchangers require optimization for their efficient use under the operational parameters of desalination units.

Practical impact. The obtained results can be used to improve the design and operating modes of condensers in thermal desalination systems. This is especially important for enhancing the efficiency of freshwater production under limited resource conditions, especially in remote and arid regions.

Key words: dehumidifier; air humidification–dehumidification; thermal desalination; energy performance; effectivity.

Анотація. Мета. Стаття присвячена проблемі глобального дефіциту прісної води, спричиненого зростанням населення, індустріалізацією та розвитком сільського господарства. Ця проблема з кожним роком набуває дедалі більшої гостроти, особливо в регіонах із посушливим кліматом та обмеженими водними ресурсами. Одним із рішень цієї проблеми є впровадження опріснювальних технологій, придатних для маломасштабного й децентралізованого виробництва прісної води.

Методика. Основну увагу зосереджено на дослідженні ключового компонента термічних опріснювальних установок – конденсатора. Наведено класифікацію типів конденсаторів, що застосовуються в цих системах. Описано основні показники ефективності конденсаторів (швидкість конденсації, коефіцієнт співвідношення масових витрат та продуктивність). Проаналізовано результати експериментальних досліджень різних типів конденсаторів із визначенням їх переваг та недоліків. Показано вплив витрат повітря і солоної води на швидкість конденсації. Встановлено залежність продуктивності системи від площі поверхні теплообміну конденсатора. Виявлено, що швидкість конденсації змінюється залежно від конструктивних особливостей та умов експлуатації. Визначено оптимальні значення коефіцієнта співвідношення масових витрат, за яких досягається максимальна швидкість конденсації. Наведено значення основних показників ефективності для різних типів конденсаторів.

Результати. У результаті встановлено, що для маломасштабних систем термічного опріснення оптимальними є конструкції конденсатора типу «труба в трубі» або зі змійовиком. Натомість трубчасто-оребрени теплообмінники потребують оптимізації для їх раціонального використання при робочих параметрах опріснювальних установок.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій та режимів роботи конденсаторів у термічних опріснювальних системах. Це сприятиме підвищенню ефективності виробництва прісної води в умовах обмежених ресурсів, зокрема у віддалених і посушливих регіонах.

Ключові слова: конденсатор; зволоження–осушення повітря; термічне опріснення; енергетичні показники; ефективність.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вода є одним із найважливіших факторів існування життя на Землі. Протягом XX століття і перших двох десятиліть XXI століття світ зіткнувся зі значним зростанням забору прісної води. Це пов'язано із зростанням населення, індустріалізацією, розвитком сільського господарства та економіки загалом. Через це природні водойми та підземні джерела вже не можуть задовольнити збільшений попит, що призводить до поширення проблеми дефіциту води у багатьох регіонах світу. За прогнозами, ця проблема лише посилиться через подальше зростання населення та інтенсивний розвиток соціально-економічної сфери. У доповіді ООН про світовий розвиток водних ресурсів 2021 року [1] наголошується, що вже протягом найближчих 20 років приблизно чверть населення планети може страждати від хронічного дефіциту води впродовж усього року. Цей виклик вимагає термінових рішень та впровадження ефективних технологій, зокрема методів опріснення солоної води, які здатні значно покращити доступність прісної води.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Технології опріснення води поділяються на дві основні групи: термічні системи, в яких випаровування та конденсація є основними процесами, що використовуються для відокремлення солей від води та мембранні системи, в яких знесолення відбувається за допомогою дії тиску або електричного поля, що змушує воду проходити через мембрану. Термічні системи опріснення є найбільш широко використовуваними в світі, і техніка зволоження-осушення (humidification-dehumidification, HDH) вважається одним з найважливіших методів цих систем. Процес HDH схожий на цикл дощу, який відбувається в природі, коли морська вода випаровується, а потім повітря переносить цю водяну пару (процес зволоження), після чого вона конденсується (процес осушення) рис. 1. Таким чином, отримується дистильована вода.

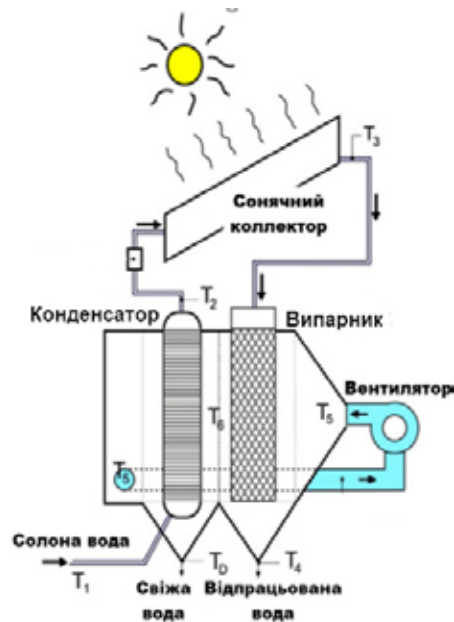


Рис. 1. Термічна система опріснення води використана в праці [7]

Одним із напрямків досліджень даних систем є аналіз їх основних компонентів – випарника та конденсатора. Аналіз різних типів випарників та порівняння їх енергетичних показників проведено в праці [2]. Конденсатор в термічних опріснювальних системах призначений для виробництва необхідної кількості дистилату шляхом конденсації вологи з повітря. Конденсатори мають більший вплив на продуктивність HDH-систем опріснення, порівняно із випарниками. Основні типи конструкцій теплообмінників, які використовують як конденсатори показано на рис. 2.

Основними показниками ефективності роботи конденсаторів у системах HDH є швидкість конденсації (Condensation Rate, CR) співвідношення масових витрат солоної води і повітря (Mass Flow Rate Ratio, MR) та продуктивність установки $G_{\text{пв}}$.

Швидкість конденсації (CR) – є важливим параметром в системах термічного опріснення і визначається



Рис. 2. Конструкції конденсаторів, які застосовують у HDH-системах

як відношення продуктивності установки до площі поверхні конденсатора:

$$CR = G_{\text{пв}} / A_{\text{cond}}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год}). \quad (1)$$

Коефіцієнт масової витрати MR визначається як співвідношення між витратами солоної води та кількістю зовнішнього повітря, що подається до системи HDH:

$$MR = G_{\text{в}} / G_{\text{пов}}. \quad (2)$$

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Провести аналіз існуючих конструкцій поверхневих теплообмінників, що застосовуються в HDH-системах, виявити їхні ключові переваги та недоліки, а також оцінити й порівняти вплив особливостей конструкції теплообмінників на продуктивність HDH-установок.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для характеристики особливостей конструкцій конденсаторів та визначення їх основних показників ефективності використано методи аналізу та порівняння. Абстрактно-логічний метод застосовано під час формування висновків і пропозицій; табличний та графічний – для наочного відображення результатів дослідження.

Об'єкт – конденсатори, що застосовуються в термічних опріснювальних системах, які працюють за принципом зволоження-осушення повітря (HDH системи).

Предмет – основні показники ефективності конденсаторів (швидкість конденсації, співвідношення масових витрат солоної води і повітря, продуктивність) конденсаторів та їхній вплив на ефективність HDH системи.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

У праці [3] автори досліджували сонячну HDH систему опріснення води із субатмосферним тиском у випарнику. Охолодження повітря та конденсація водяної пари відбувається в конденсаторі типу труба в трубі з загальною площею теплообміну $1,58 \text{ м}^2$ (рис. 3). Експерименти проводилися за постійних витрат повітря 10 кг/год , змінних тисків у випарнику ($90\text{--}50 \text{ кПа}$). Витрата солоної води під час досліджень становила $10, 20$ та 30 кг/год , а максимальна продуктивність досягала $2,15 \text{ кг/год}$.

З рис. 4 видно, що максимальне значення ER становить $1,36 \text{ кг}/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$. Це значення було зафіксовано за тиску у випарнику 50 кПа та $MR \approx 2$. Подальше збільшення витрати солоної води призводить до зниження продуктивності установки.

Автори праці [6] досліджували HDH систему опріснення води з рециркуляцією солоної води (рис. 5). Дослідження проводилися за температури води $60\text{--}80 \text{ }^\circ\text{C}$ та MR $1\text{--}6$. Конденсатор, використаний



Рис. 3. Установка використана у праці [3]

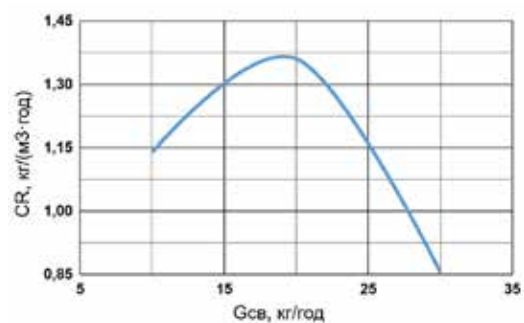


Рис. 4. Графік залежності ER від витрати води

у цій роботі, є теплообмінником зі спіральним змійовиком. Корпус має висоту $1,25 \text{ м}$, зовнішній і внутрішній діаметри $0,39 \text{ м}$ і $0,275 \text{ м}$ відповідно. Конденсатор виготовлений з листової вуглецевої сталі товщиною $1,5 \text{ мм}$. Мідний змійовик зі спіральною намоткою розміщений між кільцевими каналами, водночас діаметр спіралі знаходиться посередині. Загальна площа теплообміну мідного змійовика становить приблизно $2,088 \text{ м}^2$. Конденсатор ізолюваний вулканізуючою гумою для запобігання втрат теплоти.



Рис. 5. Схема установки HDH з мідним змійовиком у якості конденсатор

Як видно з рис. 6, ER спочатку зростає зі збільшенням витрати повітря, досягає локального максимуму, а далі зменшується за подальшого збільшення витрати повітря. Максимальне значення ER $1,25 \text{ кг}/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$ було зафіксоване за витрати повітря $12,3 \text{ кг/год}$ і масової витрати води 49 кг/год .

Найбільш поширеними типами конденсаторів у маломасштабних термічних опріснювальних системах є «труба в трубі» та «мідний змійовик» завдяки їхній подовженій формі, яка забезпечує ефективніше конденсування через триваліший контакт повітря з поверхнею. Серед них для маломасштабних установок (менше 5 кг/год) оптимальним є мідний змійовик. Натомість пластинчастий теплообмінник має низький ER через менший розмір у напрямку повітряного потоку та розрахунок на великі витрати повітря, тому він менш придатний для таких систем.

ВИСНОВКИ

1. Збільшення масової витрати повітря підвищує продуктивність HDH системи опріснення до досягнення певного максимального значення, після чого подальше збільшення масової витрати повітря призводить до значного зменшення виходу дистильованої

води. Збільшення витрати повітря зменшує час контакту між повітрям і теплообмінною поверхнею, відповідно, знижує відносну вологість повітря на виході з конденсатора.

2. Найбільші значення ER мають конденсатори типу «труба в трубі» та «мідний змійовик» завдяки їхній подовженій формі, яка забезпечує ефективніше конденсування через триваліший контакт повітря з поверхнею. Серед них для маломасштабних установок (менше 10 м³/год) найкращим є мідний змійовик. Натомість трубчасто-оребрений теплообмінник має низький ER через меншу довжину руху повітряного потоку та розрахований на великі витрати повітря.

3. Відсутність оптимальних конструкцій конденсаторів для децентралізованих автономних термічних опріснювальних установок спонукає до подальших експериментальних досліджень HDH систем.

REFERENCES

- [1] UNESCO World Water Assessment Programme (2021). The United Nations world water development report 2021: valuing water. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>.
- [2] Sereda, V. V., Prytula, N. O. (2023). Energetychni pokaznyky termichnykh oprisnuvalnykh system iz zvolozhuvachamy riznykh typiv [Energy performance of thermal desalination systems with different types of humidifiers]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, № 6, pp. 14–22. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-171-6-14-22>.
- [3] Rahimi-Ahar, Z., Ghalavand, Y., Hatamipour, M. S. (2018). Experimental investigation of a solar vacuum humidification-dehumidification (VHDH) desalination system. *Desalination*, vol. 437, № 1, pp. 73–80. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.03.002>.
- [4] Thanaiah, K., Gumtapure, V., Tadesse, G. (2021). Experimental analysis on humidification-dehumidification desalination system using different packing materials with baffle plates. *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 22, № 1, pp. 100–831. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100831>.
- [5] Moumouh, J., et al. (2016). Theoretical and experimental study of a solar desalination unit based on humidification–dehumidification of air. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, № 45, pp. 20818–20822. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.207>.
- [6] Gautam, A., Dave, T., Krishnan, S. (2023). Performance investigation of humidification dehumidification desalination with mass extraction and recirculation of rejected water. *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 41, № 1, pp. 101–813. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101813>.
- [7] Tabrizi, F. F., Khosravi, M., Shirzaei Sani, I. (2016). Experimental study of a cascade solar still coupled with a humidification–dehumidification system. *Energy Conversion and Management*, vol. 115, № 1, pp. 80–88. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.006>.
- [8] Hermosillo, J., Arancibia-Bulnes, C.A., Estrada, C.A. (2012). Water desalination by air humidification: Mathematical model and experimental study. *Solar Energy*, vol. 115, № 4, pp. 1070–1076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.09.016>.
- [9] Ahmed, A., et al. (2017). Experimental investigation of humidification-dehumidification desalination system with corrugated packing in the humidifier. *Desalination*, vol. 410, № 15, pp. 19–29. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.036>.
- [10] Nafey, A. S., et al. (2004). Solar desalination using humidification–dehumidification processes. Part II. An experimental investigation. *Energy Conversion and Management*, vol. 45, № 7–9, pp. 1263–1277. URL: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00152-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00152-3).
- [11] El-Agouz, S. A. (2010). A new process of desalination by air passing through seawater based on humidification-dehumidification process. *Energy*, vol. 35, № 12, pp. 5108–5114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.005>.
- [12] Al-Enezi, G., Ettouney, H., Fawzy, N. (2006). Low temperature humidification dehumidification desalination process. *Energy Conversion and Management*, vol. 47, № 4, pp. 470–484. URL: https://www.researchgate.net/publication/222147309_Low_temperature_humidification_dehumidification_desalination_process.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] UNESCO World Water Assessment Programme (2021). The United Nations world water development report 2021: valuing water. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>.
- [2] Серєда, В. В., Причула, Н. О. (2023). Енергетичні показники термічних опріснювальних систем із зволожувачами різних типів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, вип. 6, с. 14–22. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-171-6-14-22>.

- [3] Rahimi-Ahar, Z., Ghalavand, Y., Hatamipour, M. S. (2018). Experimental investigation of a solar vacuum humidification-dehumidification (VHDH) desalination system. *Desalination*, vol. 437, № 1, pp. 73–80. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.03.002>.
- [4] Thanaiah, K., Guntapure, V., Tadesse, G. (2021). Experimental analysis on humidification-dehumidification desalination system using different packing materials with baffle plates. *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 22, № 1, pp. 100–831. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100831>.
- [5] Moumouh, J., et al. (2016). Theoretical and experimental study of a solar desalination unit based on humidification–dehumidification of air. *International Journal of Hydrogen Energy* vol. 41, № 45, pp. 20818–20822. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.207>.
- [6] Gautam, A., Dave, T., Krishnan, S. (2023). Performance investigation of humidification dehumidification desalination with mass extraction and recirculation of rejected water. *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 41, № 1, pp. 101–813. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101813>.
- [7] Tabrizi, F. F., Khosravi, M., Shirzaei Sani, I. (2016). Experimental study of a cascade solar still coupled with a humidification–dehumidification system. *Energy Conversion and Management*, vol. 115, № 1, pp. 80–88. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.006>.
- [8] Hermosillo, J., Arancibia-Bulnes, C.A., Estrada, C.A. (2012). Water desalination by air humidification: Mathematical model and experimental study. *Solar Energy*, vol. 115, № 4, pp. 1070–1076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.09.016>.
- [9] Ahmed, A., et al. (2017). Experimental investigation of humidification-dehumidification desalination system with corrugated packing in the humidifier. *Desalination*, vol. 410, № 15, pp. 19–29. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.036>.
- [10] Nafey, A. S., et al. (2004). Solar desalination using humidification–dehumidification processes. Part II. An experimental investigation. *Energy Conversion and Management*, vol. 45, № 7–9, pp. 1263–1277. URL: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00152-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00152-3).
- [11] El-Agouz, S. A. (2010). A new process of desalination by air passing through seawater based on humidification-dehumidification process. *Energy*, vol. 35, № 12, pp. 5108–5114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.005>.
- [12] Al-Enezi, G., Ettouney, H., Fawzy, N. (2006). Low temperature humidification dehumidification desalination process. *Energy Conversion and Management*, vol. 47, № 4, pp. 470–484. URL: https://www.researchgate.net/publication/222147309_Low_temperature_humidification_dehumidification_desalination_process.

© Середя В. В., Теличко І. В.

Дата надходження статті до редакції: 12.06.2025

Дата затвердження статті до друку: 24.06.2025