

УДК 536.4

ЦИКЛ МАЙСОЦЕНКА В ПРОЦЕСАХ ДИСТИЛЯЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОДИ ТА ОПРІСНЕННЯ

Сорока П.В.¹, Ступак О.С.², доктор філософії¹аспірант, Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. Марії Капніст, 2а, 03057, Україна²доктор філософії у галузі теплоенергетики, заст. директора Інституту технічної теплофізики НАН України, ст. наук. співр., e-mail: stupakalewka@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-3115>.<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.1>

Проаналізовані технології і технічні рішення систем дистиляції та опріснення води по циклу Майсоценка. Наведено схеми процесів, устаткування та психрометричні діаграми. Показано, що М-цикл має потенціал для широкого практичного застосування.

Technologies and technical solutions for water distillation and desalination systems by Maysotsenko cycle were analyzed. Provided with diagrams of processes, installation and psychrometric diagrams. It is shown that the M-cycle has the potential for a wide range of practical applications.

Бібліографія 9, рис. 6.

Ключові слова: цикл Майсоценка, дистиляція води, опріснення води, схеми, психрометричні діаграми.

Вступ

Поверхня Землі на 70% вкрита водою, але 97% її є солоною і непридатною до вживання [1]. У зв'язку із швидкими темпами зростання населення світу відбувається значне зростання попиту на прісну воду, що призводить до її суттєвого дефіциту. Підвищення температури на Землі, високий рівень викидів парникових газів призвели до виникнення короточасних посух [2], за даними Організації Об'єднаних Націй частота кліматичних і погодних катастроф зросла в п'ять разів. Згідно з прогнозами, до 2025 року добова потреба у воді на людину збільшиться у 3...5 разів, і половина людства проживатиме в регіонах з нестачею води. Необхідність подолання глобального дефіциту води вимагає розробки нових наукових енергозберігаючих та екологічних рішень опріснення та дистиляції. В останні десятиліття відбувається суттєва інтенсифікація досліджень процесів опріснення та дистиляції води, серед яких домінують два основні напрями – мембранні і термічні технології. Мембранні технології включають ємнісну деіонізацію, мембранну дистиляцію, електродіаліз та напівпроникність у зворотному осмосі, а термічні – багатоступеневу дистиляцію, зволоження-осушення, парокompресійну дистиляцію і багатоступеневу флеш-дистиляцію [3]. Основними вимогами до всіх методів є максимальна продуктивність прісної води, низьке споживання енергії, якомога менші витра-

ти на технічне обслуговування, мінімальний залишковий вміст солей в опрісненій воді. Крім цього, важливим фактором будь-якої опріснювальної установки є її екологічність. Оскільки використання викопного палива для опріснення призводить до негативного впливу на оточуюче середовище, значна увага зосереджується на використанні альтернативних і відновлюваних джерел енергії для систем опріснення та дистиляції.

Методи опріснення

На даний час розроблені, реалізовані та комерціалізовані різні методи опріснення. Серед термічних технологій розрізняють такі основні методи, як багатоступінчата флеш-дистиляція, багатоступенева дистиляція, адсорбційна дистиляція, дистиляція зволоження-осушення та інші. Ці технології вимагають підведення теплової енергії. Нетеплові технології включають мембранну фільтрацію, зворотний осмос, електродіаліз і стиснення парів, вони основані на споживанні електричної енергії.

На ринку опріснення та дистиляції вже існують добре розроблені технології. Серед технологій термічного опріснення – багатоступінчата флеш-дистиляція і багатоступенева дистиляція, а серед технологій нетермічного опріснення – зворотній осмос. Ці технології виробляють значну кількість опрісненої води (до 45...65% від коефіцієнта відновлення); однак їх експлуатація призводить до значних негативних екологічних наслідків. Наприклад, повідомлялося, що

приблизно 10000 тон нафти на рік використовується для щоденного виробництва 1000 кубічних метрів прісної води, це дає суттєвий внесок у викиди парникових газів. Так, багатоступінчата флеш-дистиляція виділяє 6,9 кг CO_2 на один м^3 води, для багатоступеневої дистиляції і зворотного осмосу цей показник становить відповідно 5,5 кг $\text{CO}_2/\text{м}^3$ води і 3,8 кг $\text{CO}_2/\text{м}^3$ води. Крім того, концентрований розсіл, що утворюється як побічний продукт, спричиняє локальні екологічні проблеми. У цьому контексті екологічно стійкі, недорогі рішення, засновані на екологічній безпеці в край необхідні для протистояння водним проблемам і одночасного забезпечення екологічної стабільності [3].

Перспективним рішенням може бути технологія адсорбційного опріснення (АО) через її здатність працювати з низькопотенційною відпрацьованою теплою, та з відновлюваними джерелами енергії, які поглинають теплоту з навколишнього середовища. Ці технології відповідають стандартам нульових викидів вуглецю (ZCE) з нульовим/мінімальним викидом розсолу (ZLD). В АО адсорбуючий матеріал є життєво важливим утворенням, яке може мати взаємно гідрофільні та гідрофобні властивості, що відповідають робочій температурі та тиску. Швидкість виробництва прісної води в основному залежить від адсорбційної здатності адсорбуючого матеріалу та кількості циклів, що здійснюються за день. Опріснення зволоженням-осушенням (ОЗО) також є екологічно безпечним, що має значний потенціал для видалення солі з морської води [3].

Одним із перспективних напрямів опріснення/дистиляції води є застосування циклу Майсоценка [4].

Схема опріснення показана на рис. 1. Потік повітря надходить до сухого каналу, і через послідовність отворів поступає до мокрого каналу. У сухому каналі відбувається охолодження, а у мокрому – зволоження за рахунок випаровування води із водяної плівки, яка змочує стінки каналу. Потім зволожений потік ділиться на дві частини, одна з яких надходить до конденсаційного каналу, де відбувається охолодження потоку і конденсація чистої вологи, яка накопичується у резервуарі. В останні роки цьому напрямку приділяється увага у зв'язку з невеликим енергоспоживанням такого методу опріснення/дистиляції.

Метою роботи є аналіз наявних схем і технічних рішень дистиляції та опріснення води по циклу Майсоценка, які на даний час описані в літературі.

Теоретичні дослідження опріснення на основі циклу Майсоценка

В роботі [2] виконано порівняльне дослідження на базі термодинамічного моделювання трьох методів випаровування солонуватої/солонної води: пряме випарне зволоження-осушення, непряме випарне зволоження-осушення, та випарне зволоження-осушення по циклу Майсоценка. Схеми та психрометричні діаграми процесів показані на рис. 2.

Схема опріснення з прямим випарним зволоженням-осушенням з психрометричною діаграмою показана на рис. 2 а, б. Процес відбувається при подачі теплового повітря (w_1) до мокрого каналу. Потік проходить через касету з проникним поглинаючим матеріалом, який тримає в своєму об'ємі солону воду. В якості поглинаючого матеріалу використовуються осикове во-

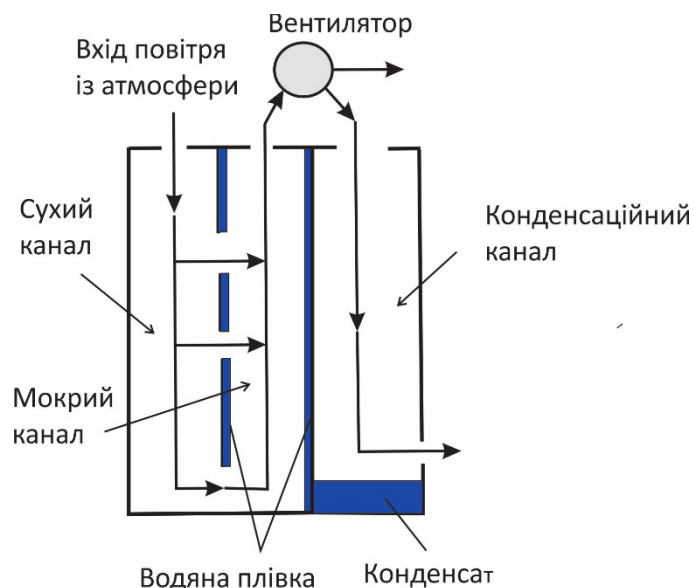


Рис. 1. Схема опріснення води по циклу Майсоценка [4]

локно, целюлозне волокно, джут, бавовняне волокно тощо. При контакті з касетою повітря зволожується і охолоджується до температури, близької до температури мокрого термометра. T_{wb} . Зволоженне охоложене повітря направляється до конденсатора/осушувача, де виробляється прісна вода. В кінці процесу стан прохолодного сухого повітря відповідає точці $d1$ на діаграмі.

Опріснювач з непрямим випарним зволоженням-осушенням відрізняється від попереднього варіанта тим, що він містить два вологих канали та один сухий канал, як показано на рис. 2 в, з. Холодопродуктивність непрямого процесу є функцією ефективності випаровування та температури по вологому термометру з потоку теплового повітря, що подається ($w1$).

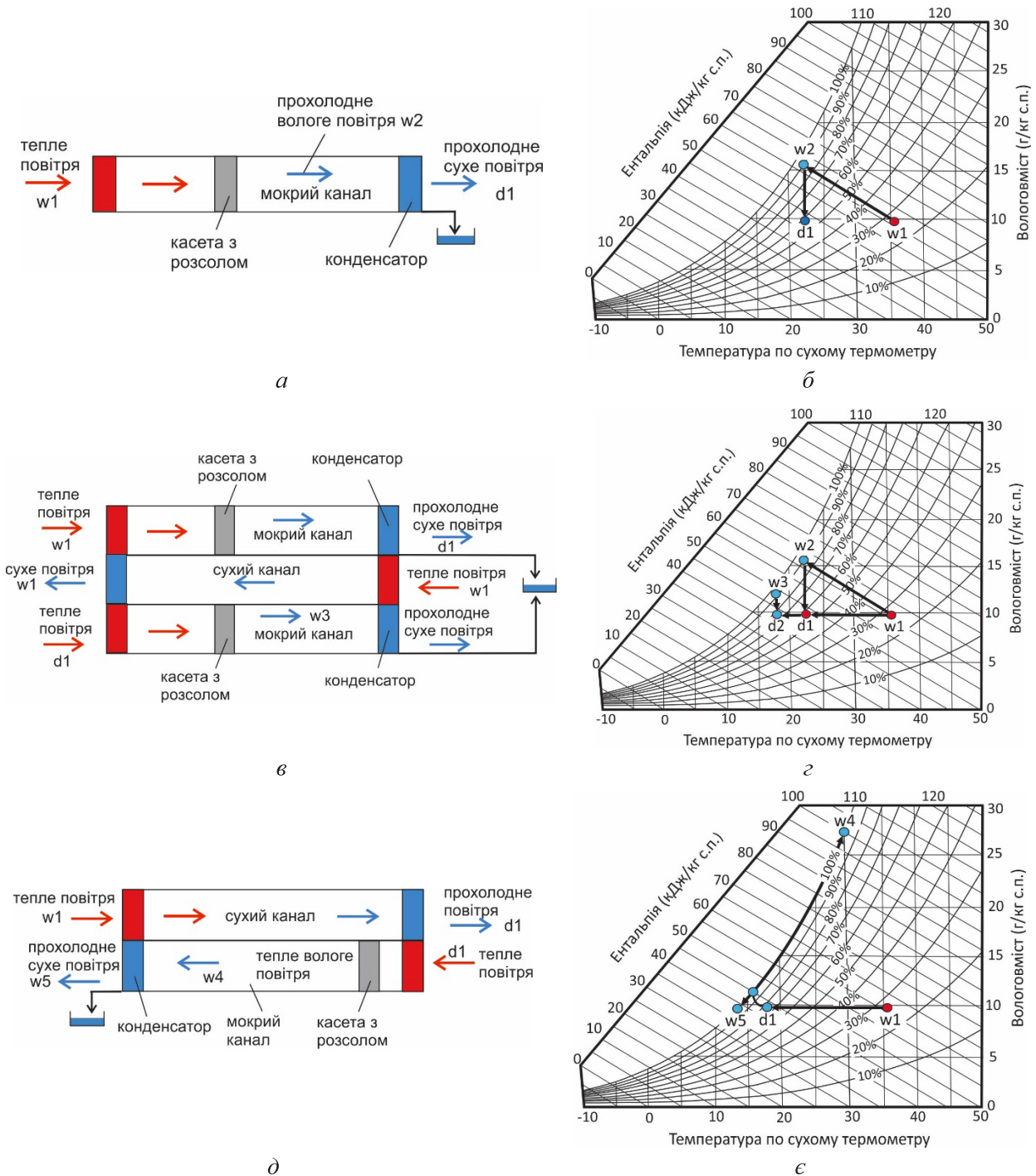


Рис. 2. Схеми та психрометричні діаграми процесів зволоження-осушення:
а, б – прямий цикл; в, з – непрямий цикл; д, е – цикл Майсоєнка

Завдяки теплообміну між стінками мокрог/сухого каналів відбувається охолодження в сухому каналі, тоді як у вологому каналі відбувається охолодження/зволоження, і цикл наближається відповідно до станів $d1$ і $w2$. У випадку непрямого охолодження стан $d1$ повітряного потоку знову направляєється до другого вологого каналу, де відбувається охолодження та зволоження завдяки наявності касети з розсолем. В результаті відбувається додаткове зволожувальне охолодження, яке ще більше знижує температуру і наближається до станів повітря $w3$. Повітряні потоки $w2$ і $w3$ осушують для отримання прісної води.

Апарати по М-циклу створювались в основному для охолодження, і на даний час існує багато схем з двома, трьома, п'ятьма каналами, та навіть з їх більшою кількістю. Для цілей опріснення ці пристрої знаходяться в стадії розробки та дослідження. В роботі [2] два канали – сухий і вологий (рис. 2 d, e), розглядалися для термодинамічної оцінки системи. Вологий канал містить касету для розсолу, яка дозволяє зволожувати потік повітря, тоді як сухий канал головним чином відповідає за створення відчутного охолодження. У порівнянні з циклами прямого і непрямого зволоження-осушення цикл Майсоценка має потенціал для досягнення температури точки роси (T_{dew}) теплого повітря, що подається, однак наближення до точки роси зале-

жить від ряду факторів (довжини каналів, ефективності тепломасообміну та ін.). Процес опріснення по циклу Майсоценка починається з надходження теплого повітря в стані ($w1$) у сухий канал. В ідеальному випадку за рахунок конвективного перетворення тепла з вологого каналу повітря $w1$ помітно охолоджується і досягає точки роси T_{dew} , перебуваючи в стані $d1$. Повітря $d1$ -стану знову направляєється у вологий канал. Завдяки наявності касети з розсолем у вологому каналі повітря стає зволоженим і досягає стану $w4$, як показано на психрометричному циклі на рис. 2 e , підтримуючи при цьому 100% відносну вологість. Після завершення процесу зволоження тепле вологе повітря ($w4$) спрямовується до конденсатора/осушувача. Потім осушена водяна пара конденсується, а повітряний потік у стані $w4$ може бути використаний для охолодження.

Відповідно, до результатів дослідження, опріснювальна установка по циклу Майсоценка є найменш енергоємною з трьох розглянутих схем.

В ряді робіт досліджувалось застосування відновлюваних джерел енергії. В роботі [5] виконано термодинамічний аналіз системи опріснення на основі зволоження-осушення з використанням М-циклу та сонячного водонагрівача. Схему установки наведено на рис. 3 a . Вона складається з апарату по М-циклу, сонячного водонагрівача, насоса та резервуара солоні

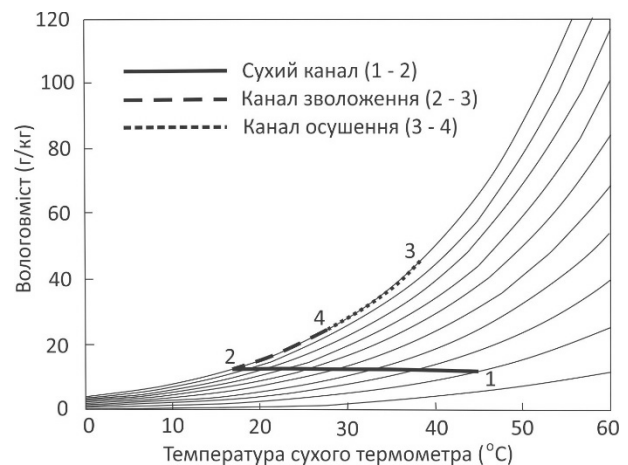
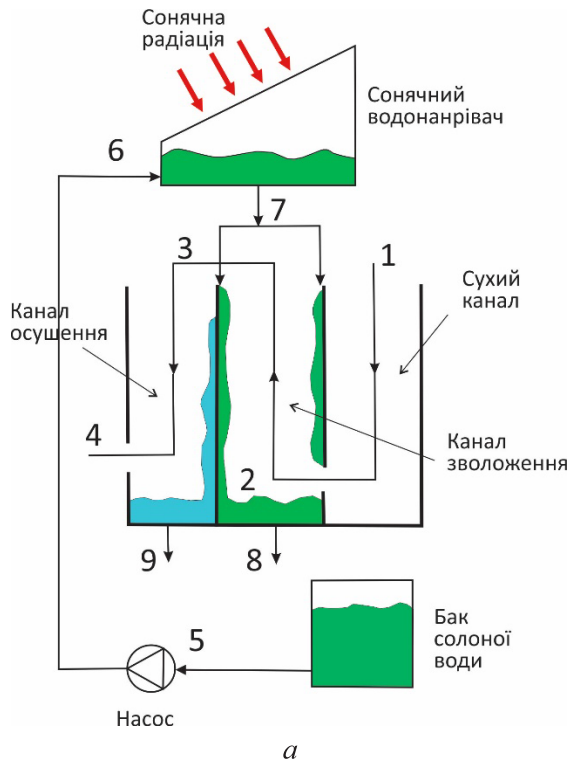


Рис. 3. Схема (а) та психрометрична діаграма (б) системи опріснення на основі М-циклу за даними роботи [5]

води. Апарат по М-циклу складається з трьох каналів: сухого каналу, каналу зволоження (випаровування) і каналу осушення (конденсації). Повітря надходить у точку 1, проходить через сухий канал, надходить у канал зволоження у точку 2, вступає в контакт із нагрітою солоною водою та зволожує повітря в точці 3. Потім вологе повітря надходить у канал осушення, де водяна пара конденсується, а опріснена вода виходить у точці 9, тоді як відпрацьоване повітря виходить у точці 4. Солона вода з резервуару в точці 5 перекачується до сонячного водонагрівача, де вона надходить у точку 6 і нагрівається до бажаної температури в точці 7. Попередньо нагріта сольова вода в точці 7 надходить у канал зволоження так, щоб повітря вступало в контакт з нею, аби стимулювати випаровування чи зволоження. У точці 8 підвищується солоність солоної води, яка виходить у вигляді розсолу. Конденсована опріснена вода відбирається в точці 9.

Психрометрична діаграма для М-циклу показана на рис. 3 б. Діаграма ілюструє три різні процеси повітряного каналу. В сухому каналі (1-2), де точка стану 1 є температурою навколишнього середовища $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ з відносною вологістю 20 %, повітря охолоджується до точки роси. Слід відмітити, що охолодження до точки роси є теоретичною межею, яка на практиці ніколи не досягається. Процес випаровування відбувається в каналі зволоження (2-3), що підвищує коефіцієнт вологості. Нарешті, насичене вологе повітря конденсується в каналі осушення (3-4). В роботі сформульовані основні фактори, які впливають на продуктивність системи опріснення та споживання енергії. Показано, що посилення вихідної потужності та питоме споживання енергії показують протилежну тенденцію для всіх розглянутих випадків. Максимальна масова продуктивність опрісненої води становить $22,3\text{ кг/год}$, що відбувається при температурі повітря на вході $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, вологовмісту 5 г/кг , температурі попередньо підігрітої солоної води на вході $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і солоності на вході 35 г/кг . Питоме енергоспоживання складає $0,23\text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$ води.

В роботі [6] виконано математичне моделювання гібридної установки охолодження житлового будинку та опріснення на основі циклу Майсоценка з фотоелектричними/термальними сонячними колекторами. Конфігурація запропонованої системи включає фотоелектричну/теплову систему, систему охолодження повітря на основі рециркуляційного осушувача, вдосконалену циклом Майсоценка, і систему зволоження-осушення-опріснення. Система опріснення використовується для отримання дистильованої води, яка накопичується в резервуарі. Навколишнє повітря

у секції регенерації проходить через цикл Майсоценка та охолоджується до температури точки роси. Повітря нагрівається теплообмінником повітря-повітря для отримання здатності поглинати вологу у більшому обсязі. Оскільки ця установка є гібридною, питоме споживання саме опріснення в роботі не вказане.

В роботі [7] запропонували та математично змоделювали опріснювальну установку зволоження-осушення, що працює від сонячної енергії та використовує зволожувач повітря на основі циклу Майсоценка (рис. 4).

Солона вода з резервуара рециркулює і нагрівається в сонячному колекторі. Підігріта вода подається в випарник-зволожувач М-циклу. Конструкція випарника пластинчатого типу складається з двох повітряних каналів: сухого та вологого. Атмосферне повітря надходить в канали випарника: у мокрому каналі воно зволожується за рахунок випаровування підігрітої води. В даній конструкції випарника робоче повітря із сухого каналу через пористу пластину поступає до мокрого каналу по всій довжині. Цей процес збільшує потенціал поглинання вологи робочим повітрям у мокрому каналі, оскільки надходження свіжого повітря змінює умови змішування; і, як наслідок, вологе повітря має тенденцію поглинати більше вологи. На відміну від традиційної схеми каналів М-циклу, яка передбачає теплообмін через стінку, у новій конструкції є необхідною теплова ізоляція між каналом сухого повітря та каналом вологого повітря, для запобігання нагріванню сухого повітря. Конденсат збирається із зволоженого повітря у теплообміннику змішувачого типу. Вода із теплообмінника далі поступає в резервуар, для використання її теплоти. В роботі розроблено та розв'язано математичну модель, яка включає моделювання всіх елементів установки.

Порівняльне дослідження показало, що запропонована система забезпечує на 30% вищу продуктивність прісної води, на 46% більший коефіцієнт відновлення та на 11% більший коефіцієнт посилення вихідної потужності порівняно з системою опріснення на основі зволожувача прямої схеми. Питоме енергоспоживання виробництва води становить $0,3\text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$ води.

Експериментальні дослідження опріснення на основі циклу Майсоценка

В роботі [8] розглянуто систему непрямого випаровування для відновлення та повторного використання стічних вод на основі М-циклу. Була розроблена та протестована установка дистиляції води. Блок дистиляції води складався з трьох суміжних каналів: сухого, випарного та конденсаційного (рис. 5). Навколишнє повітря охолоджується в сухому каналі, створюючи рушійну силу для конденсації води в конденсаційному каналі.

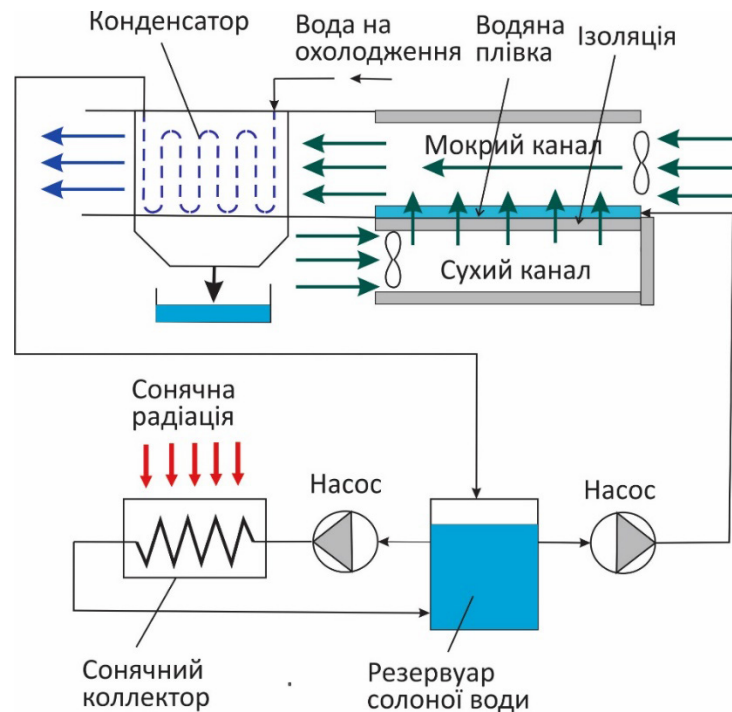


Рис. 4. Система опріснення на основі М-циклу [7]

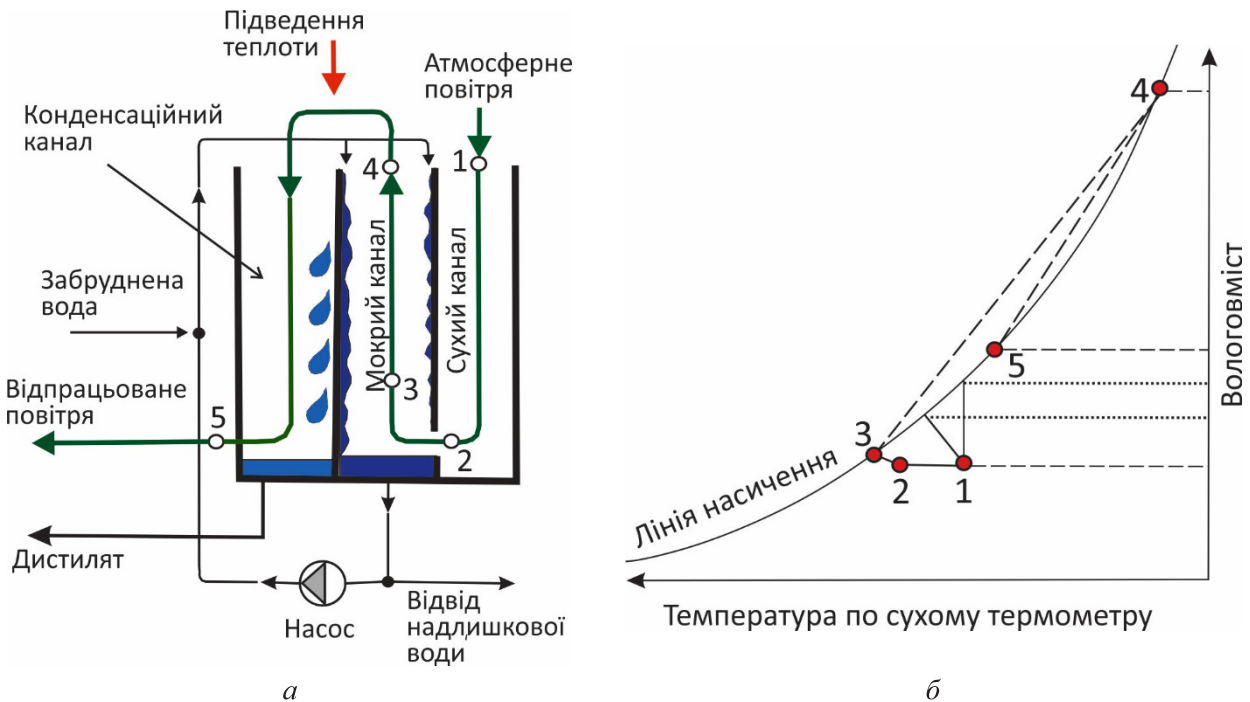


Рис. 5. Схема (а) і психрометрична діаграма (б) дистиляції стічних вод по М-циклу [8]

Глибоке охолодження (нижче вологого термометра) навколишнього повітря в сухому каналі також забезпечує вищу швидкість випаровування у випарному каналі, так що більше стічної води може випаровуватися в каналі, що призводить до більшої конденсації води в сусідньому конденсаційному каналі.

Відпрацьовану теплоту можна використовувати для попереднього підігріву насиченого повітря або стічної води для підвищення ефективності процесу дистиляції. Чим вища температура насиченого повітря або стічної води у верхній частині пристрою, тим більше конденсату (дистильованої води) може утворюватися. В ідеалі

кількість утвореного конденсату дорівнює масі води, що випарується у випарному каналі. Рушійна сила для процесів випаровування та конденсації характеризується різницею між температурою гарячого насиченого повітря у верхній частині блоку та належною точковою температурою навколишнього повітря.

Попередні експерименти на дистиляційній установці дозволили оцінити нову концепцію непрямого випаровування точки роси для відновлення стічних вод. Експерименти показали дуже незначний потік конденсату або його відсутність, якщо насичене повітря чи стічні води не отримували тепла. Попереднє нагрівання до 93 °С насиченого повітря, що надходить із виходу випарного каналу, створюючи вологе повітря, трохи збільшить потік водяного конденсату (до 2-10 % випареної води). Попереднє нагрівання стічної води до 60 °С збільшило потік водяного конденсату до 56 % випареної води.

В роботі [9] представлена пілотна установка для одночасного вироблення холоду за допомогою М-циклу, та опріснення морської води. Схема установки показана на рис. 6.

Повітря із вологого каналу додатково насичується вологою при більш високій температурі в апараті аерозольного типу, і потім поступає до осушувача, в якому відбувається конденсація вологи за рахунок безконтакт-

ного теплообміну зі свіжою морською водою. Морська вода підігрівається спочатку в осушувачі, а потім в нагрівачі за рахунок зовнішнього джерела теплоти. Установа пройшла тестові випробування. Атмосферне повітря охолоджувалось до температури нижче 25° С, а температура вологого повітря на виході із мокрого каналу була в діапазоні 5...10 °С. Продуктивність по прісній воді складала 25...125 л/год, що виявилось вищим за інші установки при тих же вхідних умовах.

Висновки

Проаналізовані технології і технічні рішення систем дистиляції та опріснення води по циклу Майсоценка, які на даний час описані в літературі. Наведено схеми процесів, устаткування та психрометричні діаграми. Показано перспективність застосування М-циклу для дистиляції та опріснення води. Даний метод має високу продуктивність з відносно малими енергозатратами, що дозволяє його застосовувати з відновлюваними джерелами енергії. Також він задовольняє вимогам до якості очищеної води – більше 99%, що є на рівні найбільш поширених сучасних методів очищення, таких як зворотній осмос та адсорбційне очищення. При цьому застосування відновлювальних джерел енергії в зв'язі з даним методом дозволяє задовольнити сучасні вимоги до екологічної безпеки, зокрема, що стосується викидів

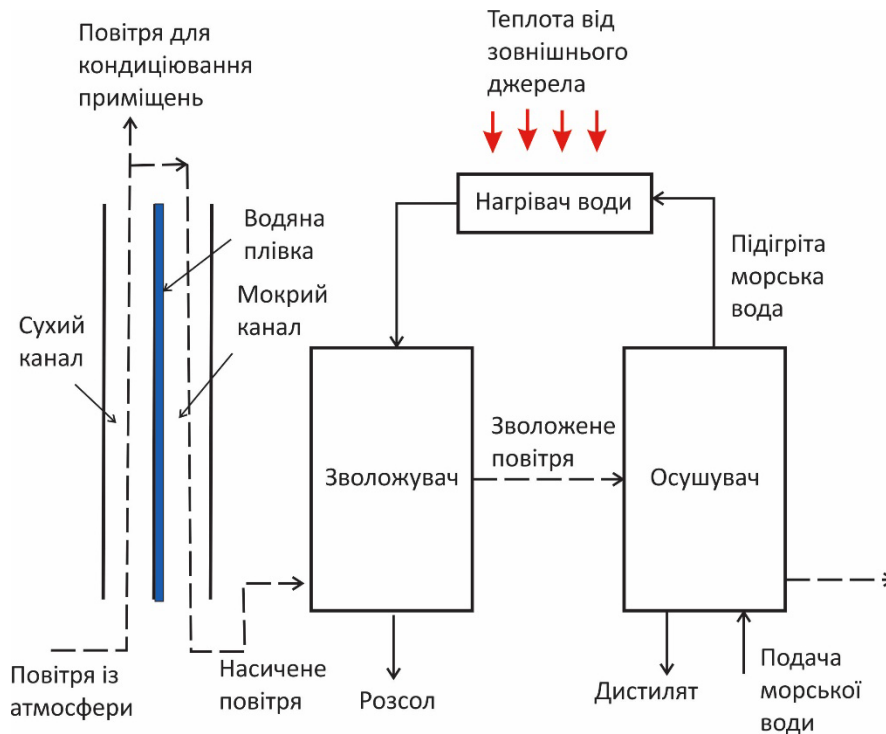


Рис. 6. Схема гібридної установки для кондиціонування приміщень та опріснення морської води

парникових газів. Важливим аспектом є застосування утилізації та регенерації відпрацьованої теплоти, що суттєво впливає на питоме енергоспоживання.

На даний час метод опріснення та дистиляції води із застосуванням М-циклу достатньо добре вивчений з теоретичної точки зору, проте необхідні додаткові дослідження в частині використання сучасних матеріалів в конструкції опріснювача.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Musie W., Gonfa G.*, Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon* (2023) 9 (8) e18685, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685>
2. *Mohammed M.; Alqahtani N.K.; Asfahan H.M.; Sultan M.* Evaporation-Assisted Humidification–Dehumidification Cycles for Desalination Application in Tropical and Subtropical Regions. *Water* (2023), 15, 1125. <https://doi.org/10.3390/w15061125>.
3. *Pandelidis D., Cicho A., Pacak A., Drag P., Drag M., Worek W., Cetin S.* Water desalination through the dewpoint evaporative system. *Energy Conversion and Management* (2021) 229, 113757 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113757>
4. *US Patent 8613839* (2013) Water desalination method and apparatus. Maisotsenko V., Gilan L., Gilan A., Gilan R.
5. *Mansoor Abdul Aziz, Jie Lin, František Mikšik, Takahiko Miyazaki, Kyaw Thu.* The second law analysis of a humidification-dehumidification desalination system using M-cycle. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (2022) 52, Part B, 102141, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102141>
6. *Nan Wang, Dongxuan Wang, Jungang Dong, Haitao Wang, Renliang Wang, Limin Shao, Yiping Zhu.* Performance assessment of PCM-based solar energy assisted desiccant air conditioning system combined with a humidification-dehumidification desalination unit. *Desalination* (2020) 496, 114705. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114705>
7. *Tariq R., Nadeem Xamán A.S., Bassam X.*, An innovative air saturator for humidification-dehumidification desalination application. *Applied Energy* (2018) 228, 789-807, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.135>.
8. *Chudnovsky Y. Kozlov A.* Integrated Wastewater Recovery and Reuse via Waste Heat Utilization. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). (2013) V.8. DOI:10.1115/IMECE2013-66646.
9. *Qian Chen, Muhammad Burhan, Muhammad Wakil Shahzad, Doskhan Ybyraiymkul, Faheem Hassan Akhtar, Kim Choon Ng.* Simultaneous production of cooling and freshwater by an integrated indirect evaporative cooling and humidification-dehumidification desalination cycle. *Energy Conversion and Management* (2020) 221, 2020, 113169, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113169>

MAISOTSENKO CYCLE FOR PROCESS WATER DISTILLATION AND DESALINATION

Soroka P.V.¹, Stupak O.S.²

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

¹*postgraduate, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist str. Kyiv, 03057, Ukraine*

²**Stupak O. S.**, *PhD in the field of Thermal and power engineering, deputy director for scientific and organizational work of the Institute of engineering thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the Institute of engineering thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, phone: (098) 446-22-35; e-mail: stupakalewka@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-3115>.*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.1>

Search for new solutions for water distillation and desalination is one of the most important challenges facing scientists around the world. One of the promising methods of distillation and desalination of water is the use of the Maisotsenka cycle – a thermodynamic process, which use a psychrometric renewed energy available from the latent heat of water, which is evaporated into the air by using the M-cycle, both energy savings and environmental benefits can be achieved. In this work, the technologies and technical solutions for distillation and water desalination systems according to the Maisovaluation cycle described in the literature are analyzed. Provided with diagrams of processes, installation and psychrometric diagrams. According to literature data, energy-saving distillation/desalination of water from stagnation of the M-cycle becomes 0.2...0.4 kW·year/kg of water, which can compete with other desalination methods. The M-cycle has been shown to have the potential for a wide range of practical installations, while being characterized by a simpler installation design. References 9, figures 6.

Key words: Maisotsenko cycle, water distillation, water desalination, schemes, psychrometric charts.

1. *Musie W., Gonfa G.*, Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon* (2023) 9 (8) e18685, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685>

2. *Mohammed M.; Alqahtani N.K.; Asfahan H.M.; Sultan M.* Evaporation-Assisted Humidification–Dehumidification Cycles for Desalination Application in Tropical and Subtropical Regions. *Water* (2023), 15, 1125. <https://doi.org/10.3390/w15061125>.

3. *Pandelidis D., Cicho A., Pacak A., Drag P., Drag M., Worek W., Cetin S.* Water desalination through the dew-point evaporative system. *Energy Conversion and Management* (2021) 229, 113757 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113757>

4. *US Patent 8613839* (2013) Water desalination method and apparatus. Maisotsenko V., Gilan L., Gilan A., Gilan R.

5. *Mansoor Abdul Aziz, Jie Lin, František Mikšik, Takahiko Miyazaki, Kyaw Thu.* The second law analysis of a humidification-dehumidification desalination system using M-cycle. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (2022) 52, Part B, 102141, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102141>

6. *Nan Wang, Dongxuan Wang, Jungang Dong, Haitao Wang, Renliang Wang, Limin Shao, Yiping Zhu.* Performance assessment of PCM-based solar energy assisted desiccant air conditioning system combined with a humidification-dehumidification desalination unit. *Desalination* (2020) 496, 114705. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114705>

7. *Tariq R., Nadeem Xamán A.S., Bassam X.*, An innovative air saturator for humidification-dehumidification desalination application. *Applied Energy* (2018) 228, 789-807, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.135>.

8. *Chudnovsky Y. Kozlov A.* Integrated Wastewater Recovery and Reuse via Waste Heat Utilization. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). (2013) V.8. DOI:10.1115/IMECE2013-66646.

9. *Qian Chen, Muhammad Burhan, Muhammad Wakil Shahzad, Doskhan Ybyraiymkul, Faheem Hassan Akhtar, Kim Choon Ng.* Simultaneous production of cooling and freshwater by an integrated indirect evaporative cooling and humidification-dehumidification desalination cycle. *Energy Conversion and Management* (2020) 221, 2020, 113169, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113169>

Отримано 01.03.2024

Received 01.03.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024