

УДК 663.634:621.472

В.С. Гевод, І.Л. Коваленко, М.І. Скиба, Ю.В. Зеленько

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ГЕЛЮДИСТИЛЯЦІЯ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНОЇ ВОДИ ПРИ АТМОСФЕРНОМУ ТИСКУ

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

Теоретично обґрунтовано і практично відтворено в лабораторних умовах процес низькотемпературного випаровування води із солоних джерел при атмосферному тиску для отримання прісного конденсату (питної води). Сутність процесу полягає в насиченні потоку атмосферного повітря водяною парою до 100% відносної вологості під дією сонячного випромінювання у спеціально створеному випарнику з наступним вилученням конденсату із вологого повітря в типовому теплообміннику-конденсаторі при температурі навколишнього середовища. З кожного квадратного метру дзеркала солоної води можна отримувати до сімдесяти літрів знесолоної води за добу, якщо процес насичення повітря вологою здійснювати при температурі 65°C, а конденсацію води з насиченого повітря проводити при 18–21°C.

Ключові слова: сонячне випромінювання, інсоляція, питна вода, низькотемпературне випаровування, прісний конденсат.

DOI: 10.32434/0321-4095-2026-166-3-62-71

Вступ

В останні десятиліття дефіцит якісної прісної води, що необхідна для задоволення фізіологічних потреб людини, збільшується в багатьох країнах. Це пов'язано з демографічним вибухом, розростанням техносфери і глобальними кліматичними змінами.

Підземні води – найбільше джерело прісної води, що доступне людству. Населення світу використовує підземні води, коли поверхневих вод недостатньо або коли посухи виснажують інші джерела. Доступність води залежить від низки чинників: температури, атмосферних опадів (їхнього характеру, кількості, інтенсивності інфільтрації), стоку (поверхневого, ґрунтового, підземного), а

також стану запасів підземних вод [1], що слугують буфером в умовах дефіциту води з поверхневих джерел. Крім перерахованих факторів, доступність води залежить від попиту на неї. За останні 100 років споживання води людством зросло більш ніж у 6 разів. При цьому обсяг забору води для потреб людства за вказаний період збільшився з приблизно 500 км³/рік до приблизно 4000 км³/рік [2,3], і тенденція до виснаження ресурсів ґрунтових вод триває [4–8]. Усвідомлення наростаючої нестачі води призвело до невідворотності глобальних оцінок водних ресурсів з використанням великомасштабних гідрологічних моделей [7,8–10]. Вони слугують основою для вдосконалення водокористуванням.

© В.С. Гевод, І.Л. Коваленко, М.І. Скиба, Ю.В. Зеленько, 2026



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

V.S. Gevod, I.L. Kovalenko, M.I. Skiba, Yu.V. Zelenko

Якість води – це характеристика складу і властивостей, яка визначає її придатність для конкретних видів використання. Якість ґрунтових вод пов'язана з низкою процесів, що формують їхній хімічний склад. До цих процесів належать: розчинення, гідроліз, іонний обмін, та біологічні перетворення. Крім цього мають місце такі чинники, як змішування вод різного походження на ділянках їхнього дотику; збільшення концентрації домішок у воді під час випаровування; насичення підземних вод вуглекислотою в зонах метаморфізму гірських порід; перебіг окислювально-відновних процесів тощо.

На даний час кількісні і якісні показники джерел природної води у багатьох країнах незворотно погіршуються. Особливо загрозливі зміни спостерігаються на територіях добування і перероблення великих родовищ корисних копалин, а також на територіях з розвиненим землеробством і на територіях збройних конфліктів.

Крім того, в світі та в Україні гострою є проблема поводження та відновлення високо мінералізованих шахтних вод, солеміст яких дорівнює або перевищує показники солоності води у світовому океані.

В умовах централізованого водопостачання відновлення якості забрудненої природної води виконують підприємства водоканалів. Однак, коли централізоване водопостачання відсутнє, то це завдання має вирішувати сам споживач води.

Для поліпшення якості води у випадках, коли вона є занадто мінералізованою, використовують зворотний осмос, іонний обмін, електродіаліз, адсорбцію на поверхні деяких природних та синтетичних матеріалів [11]. Кожен із перерахованих методів дозволяє знизити солеміст у воді до фізіологічно прийнятних значень. Однак поширен-

ня набули лише зворотно осмотичні та іонообмінні системи. Їх переваги – функціональна надійність, досконалість апаратного оформлення, відпрацьована технологія заміни зношених мембран та регенерації іонообмінних смол. Втім істотною обмежувальною обставиною є висока настановна та експлуатаційна вартість. Це спонукає пошук нових, менш витратних методологічних та апаратних рішень для отримання прісної води із води солоної.

Мета даної роботи – дослідження можливості використання низькотемпературного (<100°C) випарювання солоної води в потік повітря при атмосферному тиску під дією інсоляції в штучній водно-повітряній системі для одержання бажаної кількості прісної води і створення відповідного пристрою (випарника–конденсатора) для продукування прісної води із води з наднормативним солемістом.

Результати та обговорення

Розрахункова частина

Бажану кількість теплової енергії для здійснення низькотемпературного (<100°C) випарювання солоної води в певний об'єм ізольованого атмосферного повітря при атмосферному тиску можна отримати безпосередньо із сонячного світла. У табл. 1 наведено результати моніторингу інсоляції в деяких містах України протягом року¹.

Влітку, наприклад у червні на території м. Дніпро (48 паралель північної широти), середньодобова інсоляція складає 5,57 кВт·год на метр квадратний. Це значення і решта величин, що наведені в табл. 1, є середньоарифметичними почасових і добових кількостей сонячної енергії, що потрапляють на кожен квадратний метр освітлюваної поверхні вказаних міст. Кількість со-

Таблиця 1

Рівень інсоляції по містах України протягом року

місто	січ	лют	бер	квіт	трав	черв	лип	серп	вер	жов	лис	гру
Сімферополь	1,27	2,06	3,05	4,30	5,44	5,64	6,20	5,34	4,07	2,67	1,55	1,07
Вінниця	1,07	1,89	2,94	3,62	5,19	5,3	5,16	4,68	3,21	1,97	1,1	0,9
Луцьк	1,02	1,77	2,83	3,91	5,05	5,08	4,94	4,55	3,01	1,83	1,05	0,79
Дніпро	1,21	1,99	2,98	4,05	5,55	5,57	5,7	5,08	3,66	2,27	1,2	0,96
Донецьк	1,21	1,99	2,94	4,04	5,48	5,55	5,66	5,09	3,67	2,24	1,23	0,98
Житомир	1,01	1,82	2,87	3,88	5,16	5,19	5,04	4,66	3,06	1,87	1,04	0,83
Ужгород	1,13	1,91	3,01	4,03	5,01	5,31	5,25	4,82	3,33	2,02	1,19	0,89

¹ Карта сонячної інсоляції по містах України. Інтернет ресурс. Available from: <https://www.artenergy.com.ua/novosti/karta-solnechnoi-insoliatsii-Ukraine>

нячних днів у м. Дніпро протягом року досягає 260–290.

Рисунок 1(А) надає дані про максимальну потужність сонячного випромінювання по годинах доби, у червні на території м. Дніпро. Графік вказує на можливість досить швидкого нагріву і випаровування води протягом майже десяти годин на добу, коли потужність інсоляції перевищує 400 Вт/м². Зміну енергії інсоляції, що припадає на кожен квадратний метр освітлюваної поверхні протягом доби у червні, відображає лінія 1 на рис. 1(Б), а її середньодобове значення – лінія 2.

У відкритих водно-повітряних системах вологість над дзеркалом води є завжди більшою, ніж на значних відстанях від поверхні розподілу фаз. Це відбувається за рахунок перевищення швидкості випаровування води з її поверхні у прилягаючий шар повітря над швидкістю розсіювання (втрачання) водяної пари з цього шару у навколишнє середовище. Відносна вологість повітря біля дзеркала води у будь-якій відкритій водно-повітряній системі зазвичай становить 70–80%. Вологовміст може бути особливо високим, коли вода і повітря нагріти.

На рис. 2(А) наведено графік, що зв'язує температуру повітря і його абсолютний вологовміст при 100% відносній вологості [12]. З підвищенням температури, наприклад від 15°C до 65°C, абсолютна вологість насиченого повітря (відносна вологість 100%) зростає більш ніж у десять разів і досягає 150 грамів на кілограм повітря. Вказаному стану на графіку рис. 1(А) відповідає позиція, з якої виходять горизонтальні і вертикальна стрілки.

Рисунок 2(Б) ілюструє парціальні і загальні витрати теплової енергії, що необхідні для до-

сягнення різних значень абсолютного вологовмісту в повітрі. Зокрема лінія 1 відображає витрати енергії на підігрів певної кількості води для її наступного випаровування і насичення водяною парою одного кілограму повітря. Лінія 2 на рис. 2(Б) показує витрати енергії на підігрів кілограму повітря, що насичується водяною парою до заданого рівня. Лінія 3 показує витрати енергії на суто випаровування води, а лінія 4 відображає загальні витрати енергії для випаровування певної кількості води і насичення водяною парою одного кілограма атмосферного повітря при заданій температурі і атмосферному тиску. Позиція на лінії 4, з якої виходять горизонтальна і вертикальна стрілки, відповідає енерговитратам 120 Вт·год, які є необхідними для досягнення максимального вологовмісту (150 грам на кілограм атмосферного повітря) при температурі 65°C і атмосферному тиску. Однак виникає питання: яку загальну кількість води можна нагріти і випарувати за рахунок енергії сонячного випромінювання, що потрапляє на один квадратний метр освітленої поверхні в певному місті. Відповідь на це питання дає наступний аналіз.

1. Питома теплота випаровування води за нормальних умов складає величину 2260 кДж/кг [13], що дорівнює 0,63 кВт·год/кг. Питома теплота випаровування практично не залежить від солемісту у воді. Цей показник також слабо залежить від температури води. Таким чином, якщо маємо масу води (М), що випаровується з квадратного метра водяної поверхні за добу, то при цьому споживається енергія:

$$W_1 = K_1 \cdot M = 0.63 \cdot M, \quad (1)$$

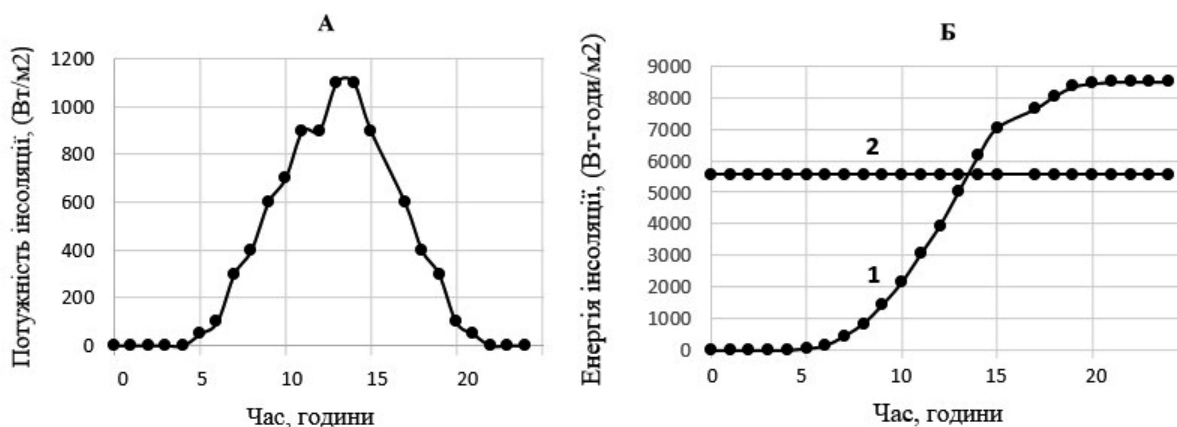


Рис. 1. А – Максимальна почасова потужність інсоляції протягом доби літку (в червні) на південному сході України.

Б – Максимальна почасова кількість енергії інсоляції літку в червні протягом доби (крива 1) і середньомісячна енергія інсоляції на території м. Дніпро в червні (лінія 2)

де W_1 – витрати енергії на випаровування маси води (M) з квадратного метру освітленої поверхні за добу; K_1 – питома теплота випаровування, що дорівнює 0,63 кВт·год/кг.

2. Питома теплоємність води за нормальних умов складає величину 4,186 кДж/кг·К [13] або приблизно 0,0012 кВт·год/кг·К, і при підвищенні солемісту у вихідній воді до рівня морської води (35 г/дм³) теплоємність знижується до 3,936 кДж/кг·К, тобто до 0,0011 кВт·год/кг·К. Якщо солоня вода масою M перед її випаровуванням підігрівається від температури t_1 до температури t_2 , то відповідне споживання енергії складатиме:

$$W_2 = K_2 \cdot M \cdot \Delta T = 0,0011 \cdot \Delta t \cdot M, \quad (2)$$

де W_2 – споживання енергії на підігрів води масою M з квадратного метра за добу; K_2 – питома теплоємність води; Δt – зростання температури.

3. Питома теплоємність атмосферного повітря при тиску 101,325 кПа складає величину 1 кДж/кг·К [13], тобто 0,00028 кВт·год/кг·К, і практично не залежить від вологості повітря. Якщо в ізольоване повітря випаровується маса води M , і насичує його вологою до точки роси при температурі t_2 , то енерговитрати на зміну температури повітря від t_1 до t_2 складатимуть:

$$W_3 = K_3 \frac{M}{m} \cdot \Delta T, \quad (3)$$

де W_3 – енерговитрати на підвищення температури

повітря; m – вологовміст в кілограмі повітря при його 100% вологості і заданій температурі; Δt – зростання температури.

З балансу енергії що надходить у водно-повітряну систему за рахунок інсоляції (у випадку, що розглядається, це 5,57 кВт·год/м² за добу в червні), і сумарних витрат енергії в цій системі, за рівняннями (1)–(3), отримуємо:

$$W = 5,57 = 0,63 \cdot M + 0,0011 \cdot \Delta t \cdot M + K_3 \frac{M}{m} \cdot \Delta T \quad (4)$$

Зокрема, коли вихідна вода має температуру 15°C, а її випаровування здійснюється при 40°C, маємо наступне:

$$M = \frac{5,57}{(0,63 + 0,0275 + 0,14)} = 6,98 \text{ (кг/м}^2\text{-доба)}. \quad (5)$$

Якщо випаровування здійснюється при 65°C, то згідно з (4) отримуємо масу пари 7,15 кг. Результати свідчать що за рахунок використання енергії сонячного випромінювання (інсоляції) при температурах від 40°C до 65°C можна в закритому водно-повітряному просторі перетворити майже сім кілограмів води на пару з квадратного метра її дзеркала за добу влітку, і наситити контактуюче атмосферне повітря водяною паром до стану крапки роси (100% відносна вологість). При цьому загальний обсяг повітря що набуває 100% відносну вологість при 40°C (рис. 2 (А)), підпорядковується рівнянню:

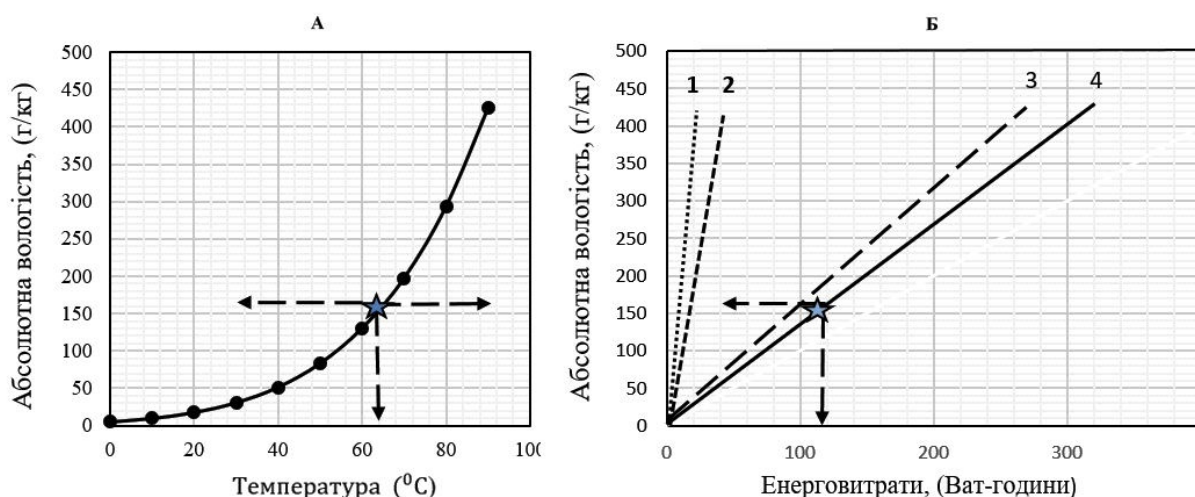


Рис. 2. Взаємозв'язок абсолютного вологовмісту і температури повітря, що насичується водяною паром до крапки роси (А), і парціальні та загальні витрати теплової енергії, що необхідні для максимального насичення вологою одного кілограму повітря при атмосферному тиску залежно від температури (Б): 1 – витрати енергії на підігрів води, що перетворюється на насичуючу пару; 2 – витрати енергії на підігрів одного кілограму повітря; 3 – витрати енергії на випаровування води; 4 – підсумкові витрати енергії

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{6,98}{0,05 \cdot 1,2} = 116,3 \text{ (м}^3\text{)}, \quad (6)$$

де V – загальний обсяг атмосферного повітря, що насичується вологою до стану крапки роси; ρ – питома вага атмосферного повітря при 40°C.

Якщо випаровування здійснюється при 65°C, то об'єм повітря що насичується вологою до 100%, скорочується втричі, тобто до 38,9 м³. Насичення атмосферного повітря водяною парою можна здійснити у його потоці крізь відповідний технічний пристрій (парникове спорудження). В цьому спорудженні потік повітря що має низьку вихідну вологість насичується водяною парою за час його перебування над дзеркалом води у просторі, відокремленому від навколишнього середовища ізолюючою оболонкою. Якщо час перебування повітряного потоку у парниковому спорудженні при 40°C буде дорівнювати одну хвилину, то обсяг повітряного простору при атмосферному тиску там має бути наступним:

$$v = \frac{V}{\tau} = \frac{116,3}{24 \cdot 60} = 0,08 \text{ (м}^3\text{)}. \quad (7)$$

Таким чином при площі основи парникового спорудження що дорівнює одному квадратному метру, товщина повітряного простору в ньому між дзеркалом води і ізолюючою оболонкою має становити вісім сантиметрів. Це відповідає розрахованій питомій продуктивності випаровування 6,98 кілограмів води з одного квадратного метру водяної поверхні за добу. Однак виникає питання, чи є достатньою швидкість випаровування води у повітря за розглянутих умов. У роботі [14] були досліджені швидкості випаровування води з температурою 40°C у навколишнє середовище при різних швидкостях руху повітря над дзеркалом води (табл. 2).

Видно, що при зміні швидкості руху повітря над поверхнею води у діапазоні від 0 м/с (природня конвекція) до 1,9 м/с (турбулентний ре-

жим руху повітря), швидкість випаровування води зростає від 0,224 г/м²·с до 0,977 г/м²·с. Цього діапазону швидкостей випаровування води цілком достатньо для насичення повітря вологою при 40°C до 100% за одну хвилину у парниковому пристрої із площею його основи 1 м² і товщиною повітряного простору 0,08 м.

Експериментальна перевірка

Результати оцінки потенційної продуктивності низькотемпературної дистиляції солоної води при атмосферному тиску експериментально перевірили на лабораторному стенді. Його принцип дії є наступним: водяна пара, що вивільняється із нагрітої солоної води в ізолюваному просторі, насичує вологою потік атмосферного повітря, котрий потрапляючи в середовище з суттєво меншою температурою повертає акумульовану вологу у вигляді дистиляту. Світлина стенду (вигляд спереду) з переліком його складових частин показана на лівій частині рисунку 3. Вигляд зверху наведено на рис. 3 праворуч, і там знизу показано світлину, що відображає крапельну конденсацію водяної пари з нагрітого вологого повітря при його охолодженні до кімнатної температури у прозорому теплообміннику.

Стенд складається з випарного пристрою а, і спіралеподібного охолоджувача-конденсатора б, як показано на рис. 3 ліворуч. Основною функціональною частиною випарного пристрою є циліндрична поліпропіленова гофрована труба 1. Її внутрішній діаметр становить 35 мм і довжина – 1430 мм. Ця труба укладена і зафіксована у вигляді змійовика на несучій платформі 2 з розмірами 300 мм × 300 мм. Робоче положення конструкції є площинно-горизонтальним. На вхідний та вихідний отвори гофрованої труби одягнені поліпропіленові фітинги 3 та 4 з патрубками для забезпечення подачі та відведення потоків води та повітря.

Через фітинг 3 відбувається подача живильної солоної води і атмосферного повітря у випарний пристрій, а через фітинг 4 відводиться

Таблиця 2

Швидкість випаровування води залежно від її температури і швидкості руху повітря

Швидкість руху повітря, м/с	Температура повітря, °C	Температура води, °C	Швидкість випаровування води, г/м ² ·с
Природня конвекція	28,9	39,6	0,224
0,2	23,9	40,2	0,269
1,0	24,5	39,8	0,531
1,9	23,1	40,0	0,977

розсіл і повітря, що насичене вологою. Розсіл спрямовується в збірник сольового концентрату. Забезпечується також підтримання заданого рівня живильної води всередині гофрованої труби випарного пристрою і продування атмосферного повітря через неї від входу до виходу над дзеркалом води для насичення повітряного потоку водяною парою. Напрямок руху води і повітря всередині гофрованої труби випарного пристрою позначена стрілками. З виходу випарного пристрою вологе повітря надходить в охолоджувач-конденсатор, де з нього виділяється конденсат як показано на світлині справа, знизу на рис. 3.

Охолоджувач-конденсатор б виготовлений із прозорого поліхлорвінілового армованого шлангу 5 (гнучкої труби) з внутрішнім діаметром 25 мм, довжиною 10 метрів та товщиною стінки 0,1 мм. Труба укладена і закріплена у вигляді спіралі з відстанню 10 мм між вітками на поверхню перфорованої пластмасової бобіни. Висота навивки спіралі на бобіні – 500 мм.

Вихідний фітінг 4 на гофрованій трубі 1 випарного пристрою (а) та вхід трубчастої спіралі охолоджувача-конденсатора (б) з'єднані стандартним гофрованим поліпропіленовим патрубком 7 зі штуцерним роз'ємом. При цьому випарний пристрій а встановлюється за допомогою фіксуючих шпильок на верхній (горизонтальній) підставі опорної бобіни охолоджувача-конденсатора б як знімний модуль. З виходу б охолоджувача-конденсатора дистильована вода спрямовується до збірника конденсату.

Відведення тепла фазового переходу при

конденсації вологи з повітря в охолоджувачі-конденсаторі б здійснюється природними конвекційними потоками зовнішнього (атмосферного) повітря.

Вода у випарний пристрій а подається з таким розрахунком, щоб її рівень усередині гофрованої труби що зафіксована на горизонтальній платформі, дорівнював половині діаметра труби. Тоді поперечний переріз повітряного каналу над водяною гладдю всередині гофрованої труби дорівнює половині площі поперечного перерізу труби.

Робочий об'єм води і повітря в випарному пристрої складають по 0,5 дм³ відповідно, а площа поверхні розподілу фаз вода–повітря – 500 см². Воду та повітря подають мініатюрний насос і вентилятор. Споживана електрична потужність насоса та вентилятора становлять 2,8 Вт та 5 Вт, відповідно.

При виконанні лабораторних експериментів швидкість насичення повітряного потоку водяною парою у випарному пристрої (цей процес є ендотермічним) та утворення конденсату в охолоджувачі-конденсаторі (цей процес є екзотермічним) досліджували при атмосферному тиску, температурі зовнішнього повітря +(18–21)^oC і температурі води всередині випарника в межах від 30^oC до 65^oC. Була забезпечена безперервна циркуляція води живлення через випарний пристрій зі швидкістю 1,2 дм³/хв. Витрата атмосферного повітря складала 15 дм³/хв. При цьому лінійна швидкість руху повітря всередині випарного пристрою становила приблизно 0,5 м/с.

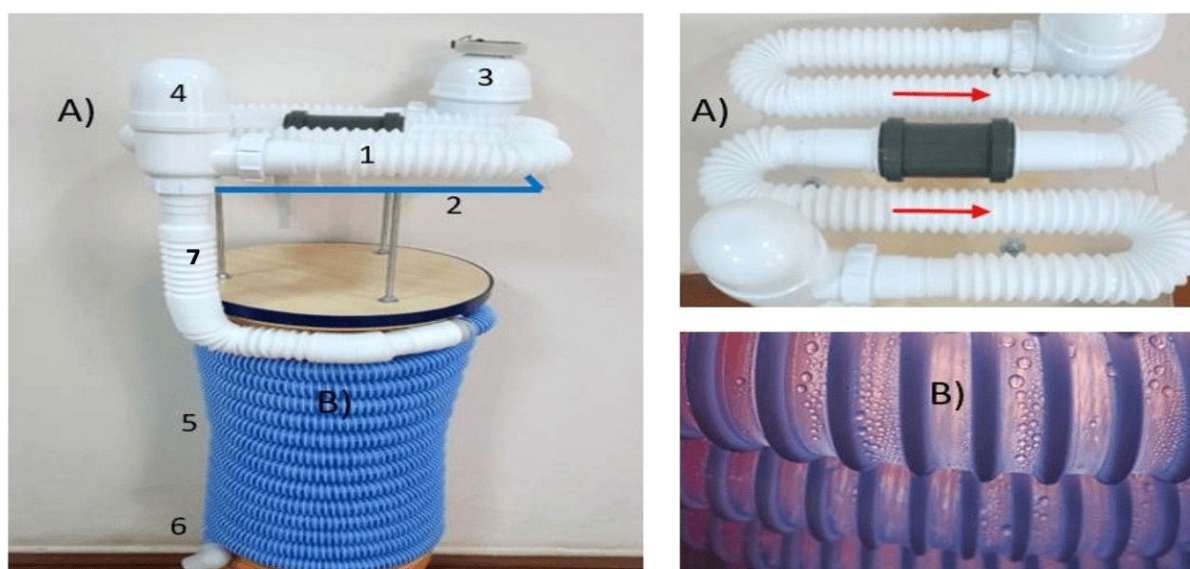


Рис. 3. Зовнішній вигляд низькотемпературного випарника-конденсатора (вигляд спереду та зверху (А)) і світлина утворення крапель конденсату всередині фрагмента труби охолоджувача-конденсатора (В)

Керований підігрів води забезпечував компактний термостат. Робочий об'єм води у системі термостат–випарний пристрій становив 1,1 дм³. Температуру води і повітря на вході та виході випарного пристрою контролювали електронним термометром з виносним щупом. Точність вимірів становила $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Витрати енергії, що пов'язані з власне випаруванням води та витрати енергії що пов'язані з тепловими втратами випарного пристрою у зовнішнє середовище, контролювали лічильником витрат електричної енергії «ORNO» виробництва КНР. Цей інструмент забезпечує вимірювання електричної потужності в межах 0,1–3600 Вт і електроенергії, що споживається, в межах 0–9999 кВт·год в реальному часі. Швидкість руху повітря в спіралі-трубчастому охолоджувачі-конденсаторі вимірювали об'ємно-метричним методом.

Швидкість насичення повітря водяною паром у випарному пристрої

Будь-яку частину у просторі створеного випарного пристрою можна розглядати як фрагмент замкненої водно-повітряної системи з одиничною площею водного дзеркала та одиничною висотою повітряного стовпа над водяною гладдю. Якщо вихідне повітря має невеликий вологовміст (абсолютною вологістю такого повітря нехтуємо), то швидкість накопичення водяної пари в обсязі повітря над дзеркалом води з одиничною площею і одиничною висотою при заданій температурі та тиску описує рівняння:

$$dC/d\tau = k \cdot (C^s - C), \quad (8)$$

де C^s – максимальний вміст вологи в газовій фазі водно-повітряної системи при заданій температурі і тиску; C – дійсний вміст вологи в газовій фазі водно-повітряної системи при заданій температурі і тиску; k – константа швидкості випарування води при заданій температурі та тиску; τ – поточний час.

Якщо ізольований фрагмент з площею водного дзеркала, що дорівнює одиниці, має іншу висоту повітряного простору над водяною гладдю, то похідну від концентрації водяної пари за часом у фрагменті з довільною висотою газової фази над дзеркалом води при заданій температурі і тиску задає наступний вираз:

$$dC/d\tau = \frac{h_0}{h} \cdot k \cdot (C^s - C), \quad (9)$$

де h_0 – одинична висота повітряного простору у водно-повітряній системі з одиничною площею

дзеркала води; h – реальна висота замкненого повітряного простору над дзеркалом води.

Тоді динаміка зміни концентрації водяної пари в замкненому повітряному просторі довільної висоти над водяною поверхнею з одиничною площею при заданій температурі та тиску підпорядковується залежності:

$$C_\tau = C^s \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h_0}{h} \cdot k \cdot \tau\right) \right]. \quad (10)$$

При цьому диференціал маси водяної пари, що пов'язаний зі зміною площі дзеркала води в комірці з висотою h над водяною гладдю, відображається рівнянням:

$$dG_\tau = C_\tau \cdot h \cdot dS, \quad (11)$$

де dG – диференціал маси водяної пари; C_τ – концентрація водяної пари, що встановлюється в замкненому водно-повітряному просторі на час τ , і має розмірність грам на кілограм; dS – елементарна зміна площі дзеркала води в замкненому водно-повітряному просторі; h – товщина шару повітря у замкненому водно-повітряному просторі.

Відповідно до рівняння (11) загальна маса водяної пари, що насичує об'єм повітря в замкненому водно-повітряному просторі, залежно від часу і площі дзеркала води при заданих температурі та тиску має бути наступною:

$$G_\tau = \int_0^S C_\tau \cdot \rho \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h_0}{h} \cdot k \cdot \tau\right) \right] \cdot h \cdot dS, \quad (12)$$

де ρ – густина повітря, при його насиченні вологою при заданій температурі та тиску.

Рішення (12) є таким:

$$G_\tau = C^s \cdot \rho \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h_0}{h} \cdot k \cdot \tau\right) \right] \cdot h \cdot S, \quad (13)$$

або:

$$G_\tau = C^s \cdot \rho \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h_0}{h} \cdot k \cdot \tau\right) \right] \cdot h \cdot b \cdot L, \quad (14)$$

де b і L – ширина і довжина дзеркала води в замкненій водно-повітряній системі з висотою h , відповідно.

Рівняння (14) дозволяє розрахувати масу водяної пари, що накопичується в заданому об'ємі повітря до заданого часу при заданій температурі, коли відомі k і C^s . Значення C^s при різних температурах та атмосферному тиску є довідковими да-

ними. Відомі також і величини швидкостей випаровування води у відкритих водно-повітряних системах при різних температурах і атмосферному тиску [14], котрі функціонально пов'язані з величинами k і тому в першому наближенні величину k при заданій температурі і атмосферному тиску можна обчислити на основі співвідношень:

$$\left(\frac{dG}{d\tau}\right)_{S_{A-W}^1} = \left(\frac{dG}{d\tau}\right)_{V_W^1} = \left(\frac{dG}{d\tau}\right)_{V_A^1} = C^s \cdot \rho \cdot k \cdot V_A^1, \quad (15)$$

де $\left(\frac{dG}{d\tau}\right)_{S_{A-W}^1}$ – швидкість випаровування води

у повітря крізь поверхню з одиничною площею при заданій температурі і атмосферному тиску;

$\left(\frac{dG}{d\tau}\right)_{V_W^1}$ – швидкість випаровування води у по-

вітря з одиничного об'єму води крізь одиничну площу поверхні випаровування у водно-повітряній системі при заданій температурі і атмосферному

тиску; $\left(\frac{dG}{d\tau}\right)_{V_A^1}$ – початкова швидкість насичен-

ня вологою одиничного об'єму повітря (V_A^1) над одиничним об'ємом води (V_W^1) у водно-повітряній системі з одиничною площею поверхні випаровування при заданій температурі і атмосферному тиску.

Тобто:

$$k = \left(\frac{dG}{d\tau}\right)_{V_A^1} \cdot \frac{1}{C^s \cdot \rho \cdot V_A^1}. \quad (16)$$

При цьому відношення величин констант швидкості випаровування води залежне від температури і підпорядковується наступному виразу:

$$\frac{k_{T_1}}{k_{T_2}} = \exp\left(-\frac{U}{RT_1}\right) / \exp\left(-\frac{U}{RT_2}\right), \quad (17)$$

де U – питома мольна енергія випаровування; R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура.

Що стосується загальної маси води, котра при роботі випарного пристрою переходить в потік повітря за певний проміжок часу, то відповідь на це питання надає рівняння:

$$G_{\tau_1} = C^s \cdot \rho \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h_0}{h} \cdot k \cdot \tau\right)\right] \cdot h \cdot b \cdot L \cdot \frac{\tau_1}{\tau}, \quad (18)$$

де τ – операційний час перебування визначеного об'єму повітря ($h \cdot b \cdot L$) у випарному пристрої, що забезпечує бажану вологість повітря; τ_1 – загальна тривалість роботи випарного пристрою.

Швидкість випаровування води з одиничного об'єму через поверхню з одиничною площею при заданій температурі та тиску є такою ж, як і швидкість випаровування води з будь-якого водного об'єму через поверхню з одиничною площею. При 65°C швидкість випаровування води у сухе повітря залежить від швидкості руху повітря і становить приблизно 3 г на секунду з квадратного метру за умов викладених в експериментальній частині. Максимальний вміст водяної пари в повітрі при 65°C та атмосферному тиску 101,325 кПа становить приблизно 150 грам на метр кубічний, оскільки щільність повітря при цій температурі дорівнює 1,06 кг/м³. Тому значення k згідно з рівнянням (17) для 65°C становить 0,02 с⁻¹. При 40°C за аналогічних умов конденсації і тиску значення k становить 0,0045 с⁻¹.

На рис. 4 (А) наведено розрахункову динаміку зростання абсолютної вологості повітря у випарному пристрої з обсягом повітря 0,5 дм³, коли $h_0/h=57,14$ ($h=1,75$ см), а значення k змінюються у межах від 0,01 с⁻¹ до 0,03 с⁻¹ при 65°C і від 0,0035 с⁻¹ до 0,0055 с⁻¹ при 40°C.

На рис. 4 (Б) наведено результати вимірювання продуктивності випарника-конденсатора, зображеного на рис. 3, залежно від температури живильної води при витраті атмосферного повітря 15 кубічних дециметрів за хвилину і його температурі в межах (18–21)°C.

Пристрій демонструє працездатність у всьому дослідженому діапазоні температур. Підвищення температури живильної води від 30°C до 65°C приводить до зростання майже у вісім разів кількості конденсату (прісної води), що вивільняється з потоку повітря після його насичення вологою. Питомі витрати енергії на випаровування є близькими до 0,63 кВт·год/кг пари що утворюється в потоці повітря. Ця енергія вивільняється з потоку нагрітого вологого повітря в теплообміннику-конденсаторі при утворенні конденсату (дистильованої води).

Практичне значення розробки

Створений пристрій може у теплу пору року (з квітня по вересень) забезпечувати споживача знесолоною (прісною) водою практично без витрати електричної енергії ззовні. Якщо процес

насичення повітря водяною парою у створеному пристрої (з площею дзеркала води 500 cm^2) триватиме безперервно при температурі 65°C з витратою повітря 15 кубічних дециметрів за хвилину, то споживач щодоби має отримувати приблизно $3,6$ літрів знесоленої води. При створенні випарного пристрою з площею дзеркала води 1 m^2 його продуктивність зростає майже у двадцять разів, тобто пристрій буде видавати 72 літри знесоленої води за добу.

Підігрів вихідної води у кількості, необхідної для безперервного функціонування випарника-конденсатора, може забезпечити типовий сонячний водонагрівач (сонячний колектор) або їхню батарею, що під'єднані до термоізолюваної ємності певного об'єму. Така ємність має бути заповнена рідким теплоносієм і виконувати функцію теплового акумулятору. Це надає можливість накопичувати теплову енергію вдень в контурі: сонячний колектор—термоізолювана ємність, і використовувати її вночі для безперервної роботи випарного пристрою.

Висновки

В умовах відсутності джерел якісної питної води і при великій кількості сонячних днів в місцях, де доступною є лише солоня вода, практично здійсненним і економічно привабливим є метод низькотемпературної дистиляції води під дією сонячного випромінення. Виконаний аналіз свідчить що під дією сонячної інсоляції влітку, в червні (на 48 паралелі), з кожного квадратного метру освітлювальної поверхні можна щодобова отримувати до семи літрів дистилляту, використовуючи вихідну солону воду. Якщо площа відбору сонячної енергії становити-

ме десять квадратних метрів, то при випаровуванні нагрітої води з площі в 1 m^2 , споживач щодобова може отримувати майже сімдесят літрів знесоленої води.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Monitoring the causes of pollution using groundwater quality and chemistry before and after the monsoon* / Rao N.S., Sunitha B., Das R., Kumar B.A. // *Phys. Chem. Earth (Pt A/B/C)*. – 2022. – Vol.128. – Art. No. 103228.
2. *Bierkens M.F.P., Wada Y. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review* // *Environ. Res. Lett.* – 2019. – Vol.14. – No. 6. – Art. No. 063002.
3. *FAO. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentacion y la agricultura – Sistemas al limite. Informe de sintesis 2021.* – Rome: FAO, 2021.
4. *De Graaf I.E.M., Marinelli B., Liu S. Global analysis of groundwater pumping from increased river capture* // *Environ. Res. Lett.* – 2024. – Vol.19. – No. 4). – Art. No. 044064.
5. *Global depletion of groundwater resources* / Wada Y., Van Beek L.P.H., Van Kempen C.M., Reckman J.W.T.M., Vasak S., Bierkens M.F.P. // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – Vol.37. – Art. No. L20402.
6. *Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally* / Jasechko S., Seybold H., Perrone D., Fan Y., Shamsudduha M., Taylor R.G., et al. // *Nature*. – 2024. – Vol.625. – No. 7996. – P.715-721.
7. *Global peak water limit of future groundwater withdrawals* / Niazi H., Wild T.B., Turner S.W.D., Graham N.T., Hejazi M., Msangi S., et al. // *Nat. Sustain.* – 2024. – Vol.7. – No. 4. – P.413-422.

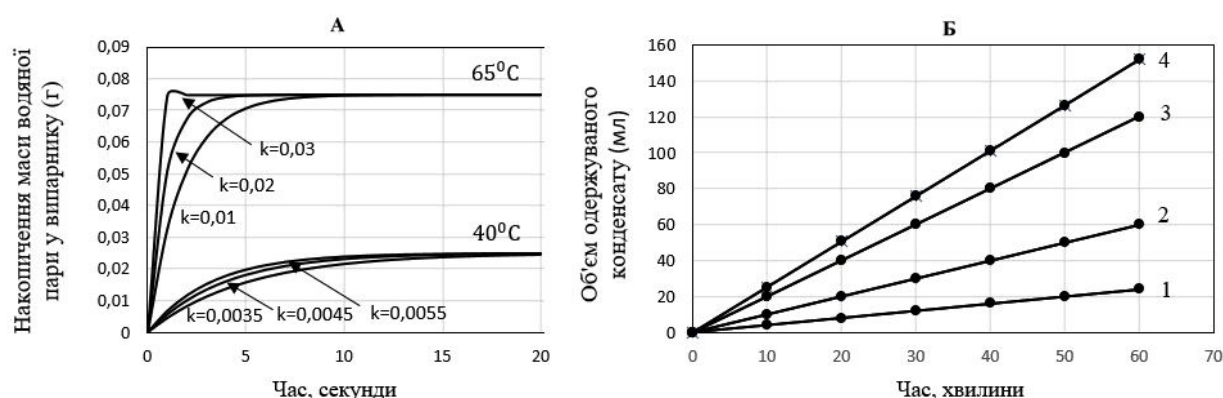


Рис. 4. А – Розрахункова динаміка накопичення водяної пари в повітряному просторі створеного випарника залежно від температури живильної солоняної води і значень констант швидкостей її випаровування (пояснення в тексті); Б – реальна продуктивність створеного випарника-конденсатора залежно від температури живильної води (1 – 30°C , 2 – 40°C , 3 – 50°C , 4 – 65°C) при витраті атмосферного повітря 15 dm^3 за хвилину і температурі на зовні випарника в межах $(18\text{--}21)^\circ\text{C}$

8. Schmied H.M., Florke M., Doll P. Global water use // The Palgrave handbook of global sustainability. – Cham: Palgrave Macmillan, 2022. – P.1-15.

9. Modeling global water use for the 21st century: the water futures and solutions (WFaS) initiative and its approaches / Wada Y., Florke M., Hanasaki N., Eisner S., Fischer G., Tramberend S., et al. // *Geosci. Model. Dev.* – 2016. – Vol.9. – No. 1. – P.175-222.

10. Human–water interface in hydrological modelling: current status and future directions / Wada Y., Bierkens M.F.P., De Roo A., Dirmeyer P.A., Famiglietti J.S., Hanasaki N., et al. // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2017. – Vol.21. – No. 8. – P.4169-4193.

11. Mohsenipour M., Shahid S., Ebrahimi K. Removal techniques of nitrate from water: a review // *Asian J. Chem.* – 2014. – Vol.26. – No. 23. – P.7881-7886.

12. Perry R.H., Green D.W. Section 12. Psychrometry, evaporative cooling, and solids drying // *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th edition. – New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2007. – 110 p.

13. Lide D.R. *CRC handbook of Chemistry and Physics*. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2005. – 2661 p.

14. Orvos M., Szabo V., Poos T. Comments to: «Rate of evaporation from the free surface at heated liquid» // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* – 2018. – Vol.59. – P.186-187.

Надійшла до редакції 23.02.2026

Надійшла після виправлення 30.04.2026

Прийнята до публікації 11.05.2026

Опублікована 26.06.2026

LOW-TEMPERATURE HELIODISTILLATION OF HIGHLY MINERALIZED WATER AT ATMOSPHERIC PRESSURE

V.S. Gevod *, I.L. Kovalenko, M.I. Skiba, Yu.V. Zelenko
Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, Ukraine

* e-mail: aquilegja@ua.fm

Both theoretically and practically, the process of evaporating water under insolation from salt springs at low temperature and atmospheric pressure to obtain fresh drinking water is described and implemented. First, a specially designed evaporator saturates the air with water vapor until it reaches 100% relative humidity under the energy of solar radiation. Next, a heat exchanger-condenser at ambient temperature removes the condensate from the moist air. Saturating the air with moisture at 65°C under insolation and allowing the water vapor to condense from the saturated air at 18–21°C makes it possible to produce up to 70 liters of desalinated water per square meter of saltwater surface per day.

Keywords: solar radiation; insolation; drinking water; low-temperature evaporation; fresh condensate.

REFERENCES

1. Rao NS, Sunitha B, Das R, Kumar BA. Monitoring the causes of pollution using groundwater quality and chemistry before and after the monsoon. *Phys Chem Earth (Pt A/B/C)*. 2022; 128: 103228. doi: 10.1016/j.pce.2022.103228.

2. Bierkens MFP, Wada Y. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. *Environ Res Lett*. 2019; 14(6): 063002. doi: 10.1088/1748-9326/ab1a5f.

3. FAO. *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura – Sistemas al limite. Informe de sintesis 2021* [The state of the world's land and water resources for food and agriculture – systems at breaking point. Synthesis report 2021]. Rome: FAO; 2021. (in Spanish). doi: 10.4060/cb7654es.

4. De Graaf IEM, Marinelli B, Liu S. Global analysis of groundwater pumping from increased river capture. *Environ Res Lett*. 2024; 19(4): 044064. doi: 10.1088/1748-9326/ad383d.

5. Wada Y, Van Beek LPH, Van Kempen CM, Reckman JWTM, Vasak S, Bierkens MFP. Global depletion of groundwater resources. *Geophys Res Lett*. 2010; 37: L20402. doi: 10.1029/2010GL044571.

6. Jasechko S, Seybold H, Perrone D, Fan Y, Shamsudduha M, Taylor RG, et al. Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*. 2024; 625(7996): 715-721. doi: 10.1038/s41586-023-06879-8.

7. Niazi H, Wild TB, Turner SWD, Graham NT, Hejazi M, Msangi S, et al. Global peak water limit of future groundwater withdrawals. *Nat Sustain*. 2024; 7: 413-422. doi: 10.1038/s41893-024-01306-w.

8. Schmied HM, Florke M, Doll P. Global water use. In: *The Palgrave handbook of global sustainability*. Cham: Palgrave Macmillan; 2022; p. 1-15. doi: 10.1007/978-3-030-38948-2_29-1.

9. Wada Y, Florke M, Hanasaki N, Eisner S, Fischer G, Tramberend S, et al. Modeling global water use for the 21st century: the water futures and solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geosci Model Dev*. 2016; 9(1): 175-222. doi: 10.5194/gmd-9-175-2016.

10. Wada Y, Bierkens MFP, De Roo A, Dirmeyer PA, Famiglietti JS, Hanasaki N, et al. Human–water interface in hydrological modelling: current status and future directions. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2017; 21(8): 4169-4193. doi: 10.5194/hess-21-4169-2017.

11. Mohsenipour M, Shahid S, Ebrahimi K. Removal techniques of nitrate from water: a review. *Asian J Chem*. 2014; 26(23): 7881-7886. doi: 10.14233/ajchem.2014.17136.

12. Perry RH, Green DW. Section 12. Psychrometry, evaporative cooling, and solids drying. In: *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th edition. New York: McGraw-Hill Professional Publishing; 2007; 110 p.

13. Lide DR. *CRC handbook of Chemistry and Physics*. Internet Version. Boca Raton, FL: CRC Press; 2005. 2661 p.

14. Orvos M, Szabo V, Poos T. Comments to: «Rate of evaporation from the free surface at heated liquid». *J Appl Mech Tech Phys*. 2018; 59: 186-187. doi: 10.1134/S0021894418010248.