

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 628.161.2:621.565:628.112

Дослідження удосконаленої конструкції установки для опріснення води та конденсації вологи з атмосферного повітря

О. Б. Василів¹✉, О. О. Коваленко², Б. М. Проць³, Б. О. Василів⁴¹⁻⁴Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹oleg_vas@ukr.netORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0597-8863>; ²<https://orcid.org/0000-0002-8009-1103>;³<https://orcid.org/0009-0009-5957-4467>; ⁴<https://orcid.org/0009-0002-3459-4858>

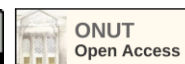
У статті представлено конструкцію гібридної установки, яка поєднує процес опріснення високо-мінералізованих вод методом непрямого виморожування з одночасним отриманням прісної води шляхом конденсації атмосферної вологи. Ключова новизна полягає у введенні до базової схеми установки для опріснення води додаткового теплообмінника «повітря-рідина» та вентилятора, що дозволяє утилізувати енергію фазового переходу (плавлення льоду) для охолодження повітря нижче точки роси. Між опрісненням виморожуванням та отриманням води з атмосферного повітря існує фундаментальна термодинамічна взаємодоповнюваність: у традиційних системах виморожування теплота для плавлення льоду забирається з навколишнього середовища без корисної роботи, тоді як системи отримання атмосферної води потребують значних енерговитрат на охолодження повітря. Установка працює у двох послідовних режимах: виморожування розчину на теплообмінних поверхнях у вигляді трубок Фільда при регульованій температурі холодоносія (різниця 0,6...1 °C між твердою фазою та поточною температурою замерзання розчину), та плавлення льоду з одночасною конденсацією водяної пари з атмосферного повітря. Експериментальні випробування на модельному розчині NaCl (0,209%) при температурі повітря 22 °C та відносній вологості 60% продемонстрували збільшення виходу прісної води на 7,1% і зниження мінералізації на 7,2% завдяки додатково отриманому конденсату. Мінералізація отриманої продуктової води (суміші розплаву льоду та конденсату атмосферної вологи) становить 989 мг/л, що відповідає нормативним вимогам до питної води. Запропонована конструкція призначена для регіонів з обмеженими ресурсами прісної води та достатньою атмосферною вологістю, забезпечуючи суміщення двох процесів водопідготовки у єдиній установці, де єдиними додатковими енерговитратами є робота вентилятора.

Ключові слова: Опріснення; Виморожування; Конденсація водяної пари; Теплообмінник «повітря-рідина»; Трубка Фільда; Енергія фазового переходу

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3379>

© 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

Глобальна нестача прісної води продовжує загострюватися під впливом зростання населення, урбанізації та кліматичних змін. Вже сьогодні близько 2,4 млрд осіб стикаються з водним стресом, а глобальне водоспоживання зростає прибли-

зно на 1% на рік починаючи з 1980-х років [1]. Саме тому зростає інтерес до технологій альтернативного водопостачання. Серед них технології опріснення, зокрема виморожуванням (FD), та отримання води з атмосферного повітря (AWG). Такі технології здатні доповнити традиційну водну інфраструктуру. Обидві технології орієнтовані на

ізолювані та посушливі регіони, де централізоване водопостачання відсутнє або економічно недоцільне. Разом з тим, кожна з них має специфічні термодинамічні та енергетичні обмеження. У цій роботі представлено конфігурацію гібридної системи FD-AWG та наведено результати її експериментальної перевірки. Отримані результати демонструють підвищення загальної ефективності гібридної системи в порівнянні з кожним окремим способом альтернативного водопостачання.

Опріснення виморожуванням (freeze desalination, FD) засноване на тому, що при охолодженні сольового розчину до температури замерзання утворюється майже чистий лід, тоді як солі залишаються у розсолі. Питома теплота плавлення льоду ($L_{\text{пл}} \approx 333$ кДж/кг) становить лише близько 13% від питомої теплоти випаровування ($L_{\text{конд}} \approx 2500$ кДж/кг), яка необхідна для термічної дистиляції. І це надає FD термодинамічну перевагу [2].

Розрізняють чотири основні конфігурації FD: пряме, непряме, евтектичне та вакуумне виморожування [2]. Непряме FD – при якому холодоагент і соловий розчин розділені теплопровідною поверхнею – є основним підходом для виробництва питної води, оскільки виключається забруднення продукту холодоагентом. Прогресивне заморожування на охолоджуваних поверхнях (вертикальні трубки, стікаючі плівки, барабани, що обертаються) забезпечує односпрямоване пошарове зростання кристалів та кращу ефективність вилучення солей порівняно зі суспензійною кристалізацією [2].

Головні перешкоди для широкого впровадження FD:

а) вартість і складність стадій відділення льоду та його плавлення;

б) захоплення частини солей між кристалічними дендритами, що обмежує ступінь знесолення за один цикл;

в) теплота плавлення льоду традиційно не утилізується – вона поглинається з навколишнього середовища і розсіюється без корисної роботи [2].

Останні дослідження визначили такі перспективні напрямки зниження витрат енергії при FD: використання холодної енергії зрідженого природного газу (LNG), гібридизація з мембранною дистиляцією та ультразвуком [2]. Розрахункові та експериментальні дослідження підтверджують, що визначальними технологічними параметрами процесу є величина переохолодження, початкова солоність та геометрія кристалізатора [3]. В роботі авторів [3] експериментально верифіковано одно-

вимірну модель тепло- і масопереносу для системи непрямого прогресивного FD, що надає кількісну основу для прогнозування якості льоду та енерговитрат у діапазоні солоностей 17,5–70 г/л.

Отримання води з атмосферного повітря (atmospheric water generation, AWG) утверджується як додаткове децентралізоване джерело прісної води. Особливо перспективною є технологія для посушливих і напівпосушливих прибережних зон, де є доступ до морської або солонуватої підземної води, але відсутня централізована інфраструктура опріснення.

Комплексний огляд 2023 року [1] класифікує технології AWG на чотири основні групи: збирання туману, збирання роси, сорбційні (адсорбційні та абсорбційні) та конденсаційні. Перші дві належать до пасивних методів, що не потребують зовнішнього джерела енергії. Сорбційні та конденсаційні є активними і вимагають підведення електричної або теплової енергії. Серед них охолоджувальна конденсація на основі парокомпресійного циклу (vapor compression cycle, VCC) забезпечує 98,9% глобального комерційного ринку AWG, оскільки надає стабільну продуктивність незалежно від сонячного випромінювання чи наявності туману [4].

Автори дослідження [4] провели всебічний енергетичний аналіз активних технологій AWG і визначили такі рівні питомого енергоспоживання: для систем на основі охолоджувальної конденсації – від 0,17 до 1,5 кВт·год/кг, для адсорбційно-десорбційних систем – від 0,9 до 4 кВт·год/кг, для абсорбційно-десорбційних систем – від 0,15 до 1 кВт·год/кг. Незважаючи на різноманітність технологій, висока енергоемність залишається суттєвим обмеженням для всіх активних систем AWG.

Нещодавні дослідження продемонстрували потенціал гібридних систем, що поєднують обертові адсорбційні елементи з системами VCC. Автори роботи [5] показали, що системи з багатоступеневими обертовими адсорбційними елементами можуть досягати швидкості отримання води 32,5 кг/год та ефективності 1,27 кг/кВт·год при несприятливих атмосферних умовах (температурі повітря, рівній 40°C та вологовмісту, рівному 5 г/кг). Дослідники [6] розробили систему з обертовими адсорбційними елементами та відновлюваними джерелами нагріву/охолодження. Система яка продемонструвала швидкість отримання води до 95,2 кг/год при оптимальній конфігурації. Однак такі системи вимагають зовнішніх джерел те-

пла для регенерації адсорбційного матеріалу (зазвичай 90°C і вище) та складної системи повітряних потоків.

Системи AWG на сонячній енергії на базі абсорбційних водоаміачних термотрансформаторів тепла та сонячних колекторів розроблено та досліджено у роботах [7, 8]. Однак такі системи демонструють обмежену ефективність у нічний час та в зимові місяці через залежність від сонячного випромінювання, що обмежує їх придатність для децентралізованої роботи [7, 8].

Огляд в роботі [1] констатує, що більшість сучасних технологій AWG залишаються сильно залежними від зовнішніх кліматичних умов, а зниження енергоспоживання потребує залучення альтернативних джерел холоду або тепла.

Між FD і AWG-VCC існує фундаментальна термодинамічна взаємодоповнюваність. У традиційних системах FD теплота для плавлення забирається із навколишнього середовища [9, 10]. Якщо цю теплоту спрямувати на охолодження вологого повітря нижче точки роси, то конденсацію атмосферної вологи можна забезпечити без додаткової роботи холодильної машини. Єдиними додатковими витратами енергії стає робота вентилятора для переміщення повітря крізь теплообмінник. Ця концепція безпосередньо усуває домінуючі витрати AWG-VCC (компресор) та одночасно перетворює скидний тепловий потік FD на корисну роботу.

Максимальний теоретичний додатковий вихід

прісної води ($\Delta W_{\max}$) від конденсації на один кілограм розплавленого льоду ($m_{\text{лід}}$) обмежений відношенням прихованих теплот:

$$\Delta W_{\max} = \frac{L_{\text{пл}}}{L_{\text{конд}}} \cdot m_{\text{лід}} = \frac{333}{2500} \cdot m_{\text{лід}} \approx 0,133 \cdot m_{\text{лід}}.$$

Тобто до 13,3% додаткової прісної води (від маси льоду) є термодинамічно доступними від конденсації атмосферної вологи, якщо вся теплота фазового переходу підводиться до теплообмінника з повітрям за температури нижче точки роси.

Метою дослідження є: представлення нової інженерної конструкції гібридної установки, що поєднує непряме опріснення виморожуванням (кристалізатор із трубками Фільда) з отриманням атмосферної води методом конденсації; експериментальна перевірка можливості отримання конденсату з використанням прихованої теплоти плавлення льоду як єдиного джерела холоду; кількісна оцінка приросту виходу прісної води та зниження її мінералізації.

2. Конструкція установки

Розроблена установка (рис. 1) побудована на базі установки для опріснення виморожуванням (патент України № 105299 [11]) та доповнена теплообмінником «повітря-рідина» (15) і вентилятором (17), що забезпечують утилізацію теплоти плавлення льоду для конденсації атмосферної вологи.

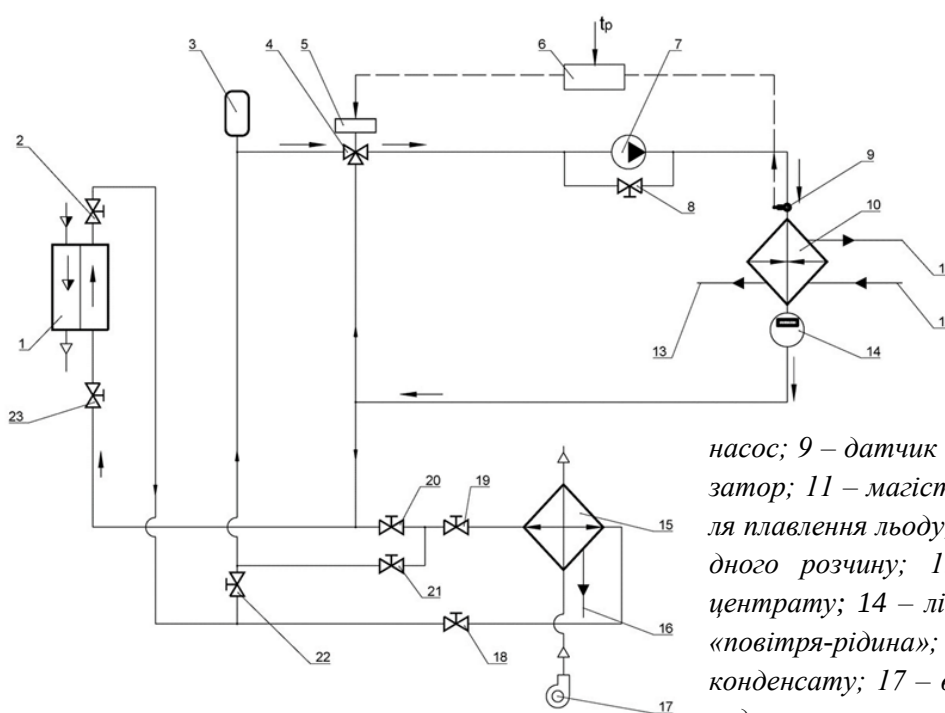


Рисунок 1 – Схема удосконаленої гібридної установки для опріснення та отримання води з атмосферного повітря: 1 – теплообмінник-випарник; 2, 8, 18–23 – вентиляти; 3 – ресивер; 4 – триходовий клапан; 5 – виконавчий механізм; 6 – блок управління; 7 – циркуляційний

насос; 9 – датчик температури; 10 – кристалізатор; 11 – магістраль для відведення води після плавлення льоду; 12 – магістраль подачі вихідного розчину; 13 – магістраль сливу концентрату; 14 – лічильник; 15 – теплообмінник «повітря-рідина»; 16 – магістраль відведення конденсату; 17 – вентилятор; 24 – трубки Фільда

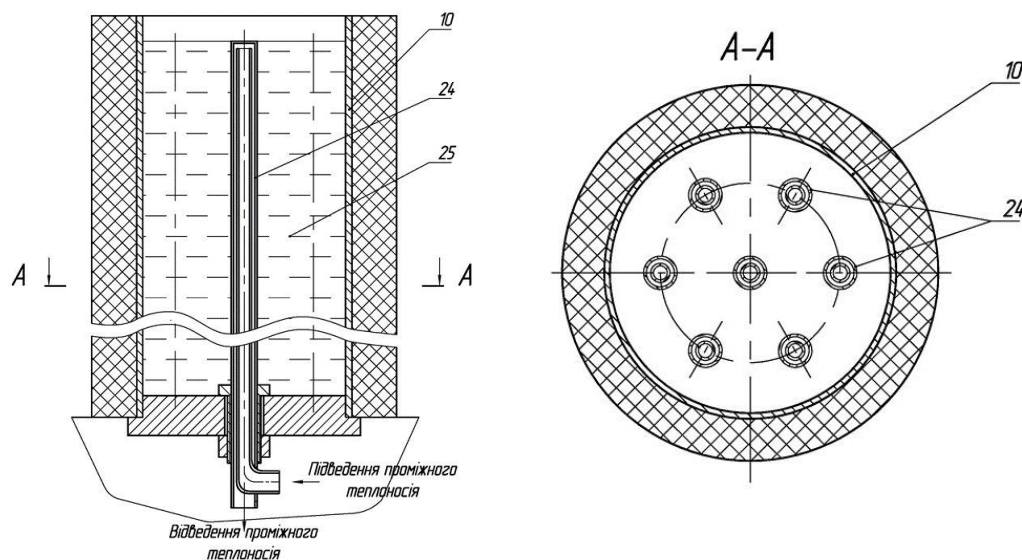


Рисунок 2 – Вигляд кристалізатора (ємності 10) з теплообмінними поверхнями – трубками Фільда 24

Базова установка (патент України № 105299 [11]) реалізує тільки процес опріснення виморожуванням. Запропонована конструкція розширює функціональність за рахунок додавкового контуру конденсації атмосферної вологи.

2.1. Функціональні елементи

Контур проміжного холодоносія. Як проміжний холодоносіє використовується водний розчин з температурою замерзання нижчою за температуру кипіння холодоагенту на 10...15 °С. Наприклад, розчин формиату калію, який відрізняється низькою в'язкістю при від'ємних температурах і високою теплоємністю, або розчин пропіленгліколю. Він охолоджується у пластинчастому випарнику (1) за рахунок кипіння холодоагенту R404A у низькотемпературній холодильній машині (не показано на схемі). Холодоносіє зберігається в ресивері (3), подається через триходовий клапан (4) до трубок Фільда (24) і повертається через лічильник (14) до випарника (1). Клапан (4) розподіляє потік між охолодженою лінією та байпасом, забезпечуючи точне регулювання температури без позиційного вмикання/вимикання компресора. Циркуляцію підтримує насос (7) з байпасним вентилем (8).

Кристалізатор та трубки Фільда. Кристалізатор (10) – вертикальна термоізольована циліндрична ємність (ізоляція стінок 60 мм). Трубки Фільда (24) – співвісні теплообмінники «труба в трубі», виготовлені зі сталі AISI 321, – герметично закріплені вертикально через дно ємності. Проміжний холодоносіє входить і виходить із кожної трубки Фільда знизу. Кристалізація відбувається одночасно на зовнішній поверхні всіх трубок Фільда, що

контактують із сольовим розчином (25). Швидкість течії холодоносія підібрана таким чином, щоб забезпечити близьку до ізотермічної температуру зовнішньої стінки трубки по всій висоті – важлива умова рівномірного зростання кристалів та мінімального захоплення солей.

Теплообмінник «повітря-рідина» (15) та вентилятор (17). У режимі плавлення проміжний холодоносіє (що несе холодний потенціал льоду, який тане) спрямовується через внутрішню поверхню теплообмінника (15), тоді як вентилятор (17) подає вологе атмосферне повітря по зовнішній поверхні. Повітря охолоджується нижче точки роси, водяна пара конденсується на зовнішній поверхні, а конденсат відводиться магістраллю (16).

Взаємне розташування кристалізатора (10), теплообмінника «повітря-рідина» (15), вентилятора (17) та вентилів перемикавання контуру конденсації на експериментальній установці показано на рис. 3.



Рисунок 3 – Загальний вигляд гібридної установки

Система управління. ПД-регулятор TPM212-Щ2 регулює потік холодоносія через триходовий клапан, дотримуючись заданої температурної програми в кристалізаторі. Усі дані (температурні часові ряди, витрата холодоносія, покази лічильника) реєструються з час-тотою 1 Гц у Microsoft Excel через SCADA-систему ADAM View по інтерфейсу RS-485.

2.2. Режими роботи

Режим 1. Опріснення виморожуванням. Вентилі 2 та 23 відкриті; вентилі 18, 20, 21 закриті. Сольовий розчин подається у ємність (10) магістраллю (12) при початковій температурі 18...20 °С. Регулятор спочатку знижує температуру холодоносія для ініціювання нуклеації (формування шару льоду товщиною близько 1...3 мм на стінці трубки при температурі, рівній -5 °С). Потім регулятор плавно підвищує температуру, підтримуючи рушійну силу процесу кристалізації (різницю між фактичною температурою фронту кристалізації та рівноважною температурою ліквідусу) в межах 0,6...1 °С. Ця стратегія безперервного відстеження ліквідусу максимізує чистоту льоду, мінімізуючи захоплення солей за рахунок конституційного переохолодження. Після завершення процесу виморожування відпрацьований концентрат зливається магістраллю (13).

Режим 2. Плавлення льоду з конденсацією атмосферної вологи. Вентилі 2 та 23 закриті, а вентилі 18 та 20 відкриті. Проміжний холодоносіє перемикається на теплообмінник (15), поглинає тепло від повітря, що надходить, та переносить його в кристалізатор (10) для плавлення льоду. Конденсат утворюється на зовнішній поверхні теплообмінника (15) та збирається магістраллю (16). Фаза плавлення льоду продовжується до того моменту,

коли зовнішня поверхня теплообмінника (15) перевищить температуру точки роси для повітря, що надходить. Після цього конденсація атмосферної вологи з повітря природно припиняється. Розплав льоду відводиться магістраллю (11).

Перед повним плавленням може бути застосована стадія гравітаційного дренажу блоку льоду для додаткового зниження солоності його розплаву. Перша порція розплаву (з підвищеним вмістом солей) збирається окремо. Конденсат атмосферної вологи (фактично дистильована вода) змішується з основним розплавом льоду у пропорціях, підібраних відповідно до цільових показників мінералізації для продуктової води.

Описана двоережимна конструкція установки була реалізована у вигляді лабораторного стенду та покладена в основу експериментальної перевірки запропонованої концепції термодинамічної інтеграції. Нижче наведено опис стенду, засобів вимірювань та методики проведення дослідів.

3. Матеріали та методи

Експериментальні дослідження проводились на кафедрі нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету. Експериментальний стенд представляє собою установку, описану в розділі 2. У даному дослідженні використовувалась ємність з діаметром 102x1,8 мм, у якій встановлено 7 трубок Фільда діаметром 12 мм і висотою 350 мм. Трубки розміщені по вершинах правильного шестикутника Ø64 мм. Товщина ізоляції ємності кристалізатора – 60 мм. Робочий об'єм сольового розчину – 2,38 дм³.

У табл. 1 наведено перелік приладів з діапазонами вимірювань параметрів та похибками.

Таблиця 1 – Засоби вимірювань та їх похибки

Параметр	Позначення	Прилад	Діапазон вимірювання	Похибка виміру
Температура	T, °С	Цифровий датчик температур DS18B20	-55...+125 °С	±0,5 °С
		Термопара ТХА 2-2-K2-H-1000-TT	-40 ... +260 °С	±0,1 °С
		Датчик температури TCM-002	-40 ... +180 °С	±0,1 °С
Витрати холодоносія	G, л/хв	Цифровий лічильник DPL 343	0,2...4,2 л/хв	±1 %
Загальна концентрація розчинених твердих речовин (солей)	C, мг/л	Кондуктометр COM100	0...8560 мг/л	±2 %
	C, г/кг	Лабораторний кондуктометр MP 513	0...100 г/кг	±1 %

Продовження таблиці 1

Параметр	Позначення	Прилад	Діапазон вимірювання	Похибка виміру
Маса розчину	M, г	Аналітичні ваги ТВЕ-0.21	0...210 г	±0,001 г
		Ваги ПВ-6	0...6 кг	±2 г
Регулювання температури	—	ПД-регулятор ТРМ212-Щ2	—	±0,4 °C
Час	τ, с	Комп'ютерний реєстратор	—	±1 с
Геометричні розміри льоду	δ, мм h, мм	Штангенциркуль / мірна шкала	—	±0,1 / ±1 мм
Відносна вологість повітря	φ, %	Психрометр / гігрометр	0...100%	±2 %

Датчики температури (DS18B20) розміщено в 16 точках вимірювання всередині кристалізатора (радіальні та осеві позиції), а також на вході та виході холодоносія з випарника і теплообмінника «повітря-рідина». Висота льодяного блоку та товщина льоду на стінці трубки Фільда в процесі виморожування зчитувалися з каліброваних мірних

шкал, встановлених всередині ємності.

Експериментальні досліді з конденсацією атмосферної вологи проводились за умов, характерних для теплого сезону чорноморського узбережжя (Одеський регіон, Україна). Вихідні, а серед них і розраховані, параметри атмосферного повітря, наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри атмосферного повітря

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Температура за сухим термометром	t	22	°C
Відносна вологість	φ	60	%
Температура точки роси (формула Магнуса)	$t_{\text{тр}}$	13,9	°C
Тиск насиченої пари при 22 °C	p_s	26,4	гПа
Парціальний тиск водяної пари	$p_v = \varphi \cdot p_s$	15,9	гПа
Вологовміст	d	9,9	г/кг сух. пов.
Абсолютна вологість	p_v	11,6	г/м³

Температура точки роси розрахована за формулою Магнуса:

$$t_{\text{тр}} = \frac{243,04 \cdot \gamma}{17,625 - \gamma}, \quad \gamma = \ln \left(\frac{\varphi}{100} \right) + \frac{17,625 \cdot t}{243,04 + t}$$

При підстановці $t = 22$ °C та $\varphi = 60$ % отримаємо $\gamma = 0,952$ та $t_{\text{тр}} \approx 13,9$ °C. Проміжний холодоносій, що надходить до теплообмінника «повітря-рідина» від льодяного блоку, має температуру в межах 0...1 °C Це значно нижче точки роси. Тобто конденсація атмосферної вологи при вказаних умовах гарантована.

4. Методика проведення дослідів

Модельний розчин NaCl готувався розчиненням зваженої наважки NaCl кваліфікації «ч.д.а.» у дистильованій воді до заданої концентрації. У даному досліді початкова концентрація сольового

розчину, який поступав на виморожування, становила 0,209% мас. (2,09 г/кг). Початкова температура розчину становила 18 °C.

Фаза виморожування. Розчин масою 2,325 кг заливали в ємність з розміщеними в ній трубками Фільда. Холодильну машину та циркуляційний насос вмикали, регулятор переводили в режим 1. При температурі холодоносія, рівній -5 °C, на стінках трубок Фільда утворювався шар льоду товщиною 1...3 мм. Далі регулятор плавно підвищував температуру, дотримуючись програми відстеження ліквідусу (від -2 до -4 °C), та підтримував рушійну силу в межах 0,6...1 °C. Тривалість виморожування становила 1,4 год.

Фаза плавлення льоду і конденсації атмосферної вологи. Після завершення виморожування вентилі перемикалися на режим 2. Вмикався вентилятор (17), що подавав атмосферне повітря (з температурою 22 °C та відносною вологістю 60 %) на

зовнішню поверхню теплообмінника (15). Такий процес тривав близько 1 год. Конденсат збирався у мірну ємність та зважувався кожні 10 хв. Фіксувались кінцеві маси конденсату і розплаву льоду. В кінцевих продуктах визначалася загальна концентрація розчинених твердих речовин (солей).

Загальну концентрацію розчинених твердих речовин (солей) у розчинах вимірювали кондуктометричним методом. Проби з низькою мінералізацією (розплав льоду, конденсат) аналізувалися приладом СОМ100, а проби з високою мінералізацією – приладом Р513. Концентрацію розчинених солей в кожній пробі вимірювали тричі. За кінцевий результат приймали середнє арифметичне значення трьох паралельних вимірювань.

Ефективність вилучення солей при виморожуванні ($R, \%$) розраховували за формулою:

$$R = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{розп.льоду}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100\%,$$

де $C_{\text{вх}}$ – загальна концентрація розчинених солей у розчині, що поступає на виморожування, мг/л; $C_{\text{розп.льоду}}$ – загальна концентрація розчинених солей у розплаві льоду, мг/л.

Якість продуктової води, а саме її мінералізацію, оцінювали відповідно до чинного нормативного законодавства у галузі питного водопостачання.

5. Результати та обговорення

2,325 кг водного розчину NaCl (0,209 % мас.) з рівноважною температурою замерзання, рівною $-0,13^\circ\text{C}$, виморожували протягом 1,4 год. Внаслідок такого процесу на трубках Фільда кристалізувалося 1053 г льоду. Загальна концентрація розчинених солей в розплаві льоду становила 0,106 % мас.

Після розділення вихідного сольового розчину виморожуванням крім льоду утворився ще концентрований сольовий розчин масою 1,272 кг. Такий розчин зливався магістраллю (13) із ємності, в якій попередньо відбувався процес виморожування.

Розрахована ефективність вилучення солей при виморожуванні на експериментальній установці склала:

$$R = \frac{0,209 - 0,106}{0,209} \approx 49,3 \%$$

Цей результат узгоджується з показниками прямого прогресивного виморожування, наведеними у літературі [2, 3] для одноступеневої уста-

новки, в якій опріснювали розчини NaCl при помірних температурах охолодження.

Під час приблизно однієї години тривалості такого процесу теплообмінник «повітря-рідина» приймав атмосферне повітря при $t=22^\circ\text{C}$, $\phi=60\%$ та $t_{\text{тр}}=13,9^\circ\text{C}$. Температура проміжного холодоносія на вході в теплообмінник залишалася на рівні нижче 5°C протягом усього конденсаційного періоду, тобто значно нижче точки роси повітря.

На етапі плавлення льоду та конденсації атмосферної вологи було отримано 75 г конденсату атмосферної вологи. За мінералізацію – це дистилат.

Продуктова вода в гібридній установці – це суміш розплаву льоду та конденсату атмосферної вологи. Після змішування таких двох рідких потоків отримали продуктову воду, маса якої становить:

$$m_{\text{прод.вода}} = 1053 + 75 = 1128 \text{ г.}$$

А концентрація розчинених речовин (солей) у продуктової воді становить:

$$C_{\text{прод.вода}} = \frac{1053 \cdot 0,106}{1128} \approx 0,0989 \% \text{ мас.} = 989 \text{ мг/л.}$$

Таким чином, експериментальне випробування створеної гібридної установки показало:

- загальний приріст в технології виходу прісної води на 7,1 % ($75 \text{ г} / 1053 \text{ г}$);
- зниження мінералізації продуктової води на 7,2 % (з 0,106 % до 0,0989 % мас.).

Важливо відмітити, що продуктова вода за показником мінералізації відповідає чинним нормативним вимогам щодо якості питної води. Мінералізація продуктової води становить 989 мг/л і це менше граничного значення, рівного 1000 мг/л.

6. Висновки

Представлено удосконалену конструкцію гібридної установки, що поєднує непряме опріснення виморожуванням (кристалізатор із трубками Фільда) з отриманням води шляхом конденсації атмосферної вологи. Конструкція передбачає використання теплообмінника «повітря-рідина» та вентилятора як єдиних додаткових елементів до базової установки для опріснення виморожуванням.

Гібридна установка працює в двох послідовних автоматизованих режимах: 1 - контрольована кристалізація з ліквідус-відстежуючим регулюванням температури, що підтримує рушійну силу процесу в межах $0,6-1^\circ\text{C}$; 2 - плавлення льоду в поєднанні з конденсацією атмосферної вологи та з

використанням прихованої теплоти плавлення льоду як основного джерела холоду.

Виконане експериментальне дослідження на модельному водному розчині NaCl (0,209 % мас.) підтвердило практичне значення запропонованої конструкції гібридної установки. Із 2325 г вихідного сольового розчину отримано 1053 г прісної води (розплав льоду) та додатково 75 г конденсату атмосферної вологи. Їх змішування для отримання продуктової води дало приріст загального виходу прісної води в установці на 7,1 % та зниження мінералізації кінцевого продукту на 7,2%. Мінералізація продуктової води становить 989 мг/л і відповідає за цим показником вимогам нормативних документів.

Розраховано, що максимальний теоретичний додатковий вихід прісної води становить 13,3 % на одиницю маси льоду.

Виготовлена установка та виконані на ній попередні експериментальні дослідження підтверджують термодинамічне обґрунтування доцільності інтеграції опріснення виморожуванням з отриманням води із атмосферного повітря. Це також закладає базу для майбутніх досліджень у широкому діапазоні мінералізації води, вологовмісту та витрат повітря.

Подальші наші дослідження передбачають вирішення наступних завдань: верифікацію результатів на основі досліджень для більш широкого діапазону мінералізації води (2...80 г/кг); параметричне дослідження впливу витрати та температури повітря на вихід конденсату; детальний енергетичний аналіз процесів, що відбуваються в установці; техніко-економічне порівняння з автономними системами для опріснення виморожуванням та отримання води із атмосферного повітря.

Особистий внесок авторів CRediТ

Василів О.Б.: концептуалізація; методологія; аналіз та узагальнення даних; написання – початковий варіант рукопису; створення експериментального стенду. **Коваленко О.О.:** концептуалізація; формальний аналіз; написання – рецензування та редагування. **Проць Б.М.:** дослідження (проведення експериментів); збір та обробка даних; верифікація результатів; створення експериментального стенду. **Василів Б.О.:** інформаційний пошук; візуалізація; написання – початковий варіант рукопису.

Література

1. **Thavalengal M. S., Jamil M. A., Mehroz M., Xu B. B., Yaqoob H., Sultan M., Imtiaz N., Shahzad M. W.** Progress and prospects of air water harvesting system for remote areas: A comprehensive review // *Energies*. – 2023. – Vol. 16(6). – P. 2686. <https://doi.org/10.3390/en16062686>
2. **Janajreh I., Zhang H., El Kadi K., Ghaffour N.** Freeze desalination: Current research development and future prospects // *Water Research*. – 2023. – Vol. 229. – P. 119389. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119389>
3. **Zhang H., Janajreh I., Hassan Ali M. I., Askar K.** Freezing desalination: Heat and mass validated modeling and experimental parametric analyses // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 26. – P. 101189. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101189>
4. **Potyka J., Dalibard A., Tovar G.** Energetic analysis and economic viability of active atmospheric water generation technologies // *Discover Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 6(4). – P. 153. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05746-z>
5. **Tu R., Hwang Y.** Performance analyses of a new system for water harvesting from moist air that combines multi-stage desiccant wheels and vapor compression cycles // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – Vol. 198. – P. 111811. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111811>
6. **Liu M., Tu R., Wu Z., Zhu J.** Performance analyses of desiccant wheel-assisted atmospheric water harvesting system using renewable heating and cooling sources // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 252. – P. 115065. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115065>
7. **Тітлов О., Годик К., Кравченко Д., Осадчук Є.** Розробка установок отримання води з атмосферного повітря в складі систем життєзабезпечення житлового будинку в кліматичних умовах Одеської області // *Холодильна техніка та технологія*. – 2021. – Т. 57(4). – С. 218-228. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i4.2212>
8. **Осадчук Є., Тітлов О.** Пошук енергоефективних режимів роботи систем отримання води з атмосферного повітря на базі абсорбційних водогрійних термотрансформаторів тепла і сонячних колекторів. // *Холодильна техніка та технологія*. – 2020. – Т. 56 (3-4). – С. 78-91. <https://doi.org/10.15673/ret.v56i3-4.1951>

9. **Василів О. Б., Коваленко О. О., Проць Б. М., Вовченко А. І.** Установка для опріснення та одержання води з атмосферного повітря: пат. 128629 С2 Україна: МПК C02F 1/22, E03B 3/28. – № а 2022 00703; заявл. 17.02.2022; опубл. 04.09.2024, Бюл. № 36. – 8 с.
10. **Василів О. Б., Коваленко О. О., Проць Б. М., Вовченко А. І.** Спосіб одержання опрісненої води шляхом виморожування: пат. 128630 С2 Україна:

- МПК C02F 1/22, B01D 9/04, F25C 1/12, E03B 3/28. – № а 2022 00704; заявл. 17.02.2022; опубл. 04.09.2024, Бюл. № 36. – 6 с.
11. **Василів О. Б., Коваленко О. О., Тітлов О. С., Іщенко С. В.** Установка для опріснення води: пат. 105299 UA: МПК C02F 1/22 (2006.01). – № а 2013 00397; заявл. 11.09.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8. – 4 с.

Отримана в редакції 29.01.2026, прийнята до друку 03.03.2026

Research of improved design of a water desalination and atmospheric moisture condensation unit

Oleh Vasyli¹✉, Olena Kovalenko², Bohdan Prots³, Bohdan Vasyli⁴

¹⁻⁴Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹oleg_vas@ukr.net

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0597-8863>; ²<https://orcid.org/0000-0002-8009-1103>;

³<https://orcid.org/0009-0009-5957-4467>; ⁴<https://orcid.org/0009-0002-3459-4858>

A hybrid system design is presented that combines the process of desalinating highly mineralized water by indirect freeze desalination with the simultaneous production of fresh water through atmospheric moisture condensation. The key novelty lies in the introduction of an additional air-to-liquid heat exchanger and a fan into the base freeze desalination unit, enabling the utilization of phase transition energy (ice melting) to cool air below the dew point. A fundamental thermodynamic complementarity exists between freeze desalination and atmospheric water generation: in conventional freeze desalination systems, the heat required for ice melting is drawn from the surroundings without performing useful work, whereas atmospheric water generation systems demand substantial energy input for air cooling. The unit operates in two sequential modes: freezing of the solution onto Field tube heat exchange surfaces at a controlled coolant temperature (maintaining a 0,6...1 °C differential between the solid phase and the current freezing point of the solution), and ice melting with simultaneous condensation of water vapor from atmospheric air. Experimental trials on a model NaCl solution (0,209%) at an air temperature of 22 °C and relative humidity of 60% demonstrated a 7,1% increase in fresh water yield and a 7,2% reduction in mineralization owing to the additionally recovered condensate. The mineralization of the product water obtained (a blend of ice melt and atmospheric moisture condensate) is 989 mg/L, which complies with regulatory requirements for drinking water. The proposed design is intended for regions with limited freshwater resources and adequate atmospheric humidity, providing the integration of two water treatment processes within a single unit, where the only additional energy input is the power consumed by the fan.

Keywords: Desalination; Freeze desalination; Water vapor condensation; Air-to-liquid heat exchanger; Field tube; Phase-transition energy.

References

1. **Thavalengal, M. S., Jamil, M. A., Mehroz, M., Xu, B. B., Yaqoob, H., Sultan, M., Imtiaz, N., Shahzad, M. W.** (2023). Progress and prospects of air water harvesting system for remote areas: A comprehensive review. *Energies*, 16(6), 2686.
2. **Janajreh, I., Zhang, H., El Kadi, K., Ghaffour, N.** (2023). Freeze desalination: Current research development and future prospects. *Water Research*, 229, 119389.
3. **Zhang, H., Janajreh, I., Hassan Ali, M. I., Askar, K.** (2021). Freezing desalination: Heat and mass validated modeling and experimental parametric analyses. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101189.
4. **Potyka, J., Dalibard, A., Tovar, G.** (2024). Energetic analysis and economic viability of active atmospheric water generation technologies. *Discover Applied Sciences*, 6(4), 153.
5. **Tu, R., & Hwang, Y.** (2019). Performance analysis of...

ses of a new system for water harvesting from moist air that combines multi-stage desiccant wheels and vapor compression cycles. *Energy Conversion and Management*, 198, 111811.

6. **Liu, M., Tu, R., Wu, Z., & Zhu, J.** (2022). Performance analyses of desiccant wheel-assisted atmospheric water harvesting system using renewable heating and cooling sources. *Energy Conversion and Management*, 252, 115065.

7. **Titlov, O., Hodyk, K., Kravchenko, D., & Osadchuk, Ye.** (2021). Development of units for obtaining water from atmospheric air as part of life support systems for a residential building in the climatic conditions of the Odesa region. *Refrigeration Engineering and Technology*, 57(4), 218-228.

8. **Osadchuk, Ye., & Titlov, O.** (2020). Search for energy-efficient operation modes of systems for obtaining water from atmospheric air based on absorption

water-ammonia thermal transformers and solar collectors. *Refrigeration Engineering and Technology*, 56 (3-4), 78–91.

9. **Vasyliv, O. B., Kovalenko, O. O., Prots, B. M., & Vovchenko, A. I.** (2024). Apparatus for desalination and obtaining water from atmospheric air. Patent UA No. 128629 C2. *Odesa National University of Technology*.

10. **Vasyliv, O. B., Kovalenko, O. O., Prots, B. M., & Vovchenko, A. I.** (2024). Method for obtaining desalinated water by freezing. Patent UA No. 128630 C2. *Odesa National University of Technology*.

11. **Vasyliv, O. B., Kovalenko, O. O., Titlov, O. S., & Ishchenko, S. V.** (2014). Apparatus for water desalination]. Patent UA No. 105299. *Odesa National Academy of Food Technologies*.

Received 29 January 2026

Approved 03 March 2026

Available in Internet 31 March 2026