

## ОПРІСНЕННЯ ВОДИ З ВИКОРИСТАННЯМ НАМОРОЖУВАННЯ ЛЬОДУ В БУРУЛЬКАХ

*Мета дослідження - вивчити вплив початкової солоності та витрати води на процеси опріснення в бурульках, що утворюються на горизонтальних насадках.*

*Експериментальна установка, представляє собою каркас на якому закріплені: ємність з вихідною солоною водою, поверхня удару, горизонтальні насадки. Початкова солона вода 10-30 г/л витікала через отвір, падала та подрібнювалась об поверхню удару, після чого замерзала на насадках у вигляді бурульок. Для дослідження ступеня солоності бурульки поділялись на рівні частини та плавилась.*

*З результатів дослідження видно, що отримана вода містить найменше солей в тих частинах, що знаходяться ближче до основ бурульок. При витраті в 2 мл/с бурульки в довжину зростали повільно. Ступінь опріснення визначалась як відношення початкової до отриманої солоності води і складала від 1,5 до 4, більші значення отримані при витраті 1 мл/с, та на перших відрізках.*

*Висновки: Результати експериментів показали що неможливо опріснити солону воду за 1 цикл. Для отримання питної води з концентрацією солі менше 0,5 г/л потрібно використовувати декілька циклів заморожування-плавлення або комбінувати з іншими методами опріснення. Потрібно контролювати оптимальну витрату води для забезпечення більшого ступеня опріснення.*

**Ключові слова:** опріснення виморожуванням, бурульки, солоність, поверхня удару, кристалізація, витрата солоної води.

**Вступ.** Першим хто досліджував опріснення заморожуванням був датський лікар Томас Бартолінус (1616-1680). Однак найперший опис робочого методу очищення води шляхом заморожування був зроблений Антоном Марією Лоргною. У 1786 році Лоргна опублікував свою першу статтю.

Починаючи з морської води із загальним вмістом розчинених солей (tds) 36 200 ppm, він зробив наступну серію з п'яти послідовних дослідів із кристалізацією води в ємності, щоразу заморожуючи рідину, отриману шляхом танення льоду попередньої заморозки. Лоргна зауважив, що крижаний блок, утворений з морської води, завжди містив центральне ядро рідкої води, в якому було зосереджено більшість розчинених солей та домішок води. Після трьох послідовних циклів заморожування і плавлення солоної води він отримав воду, придатну для пиття.

Протягом 1788-1789 років Лоргна досліджував очищення сечі шляхом заморожування. В останній час та сама процедура знову була запропонована для відновлення прісної води з сечі на космічних апаратах. [1]

У [2] розглядаються три широкі методи проведення процесу замороження-плавлення (в літературі позначається через абривіатуру FM): заморожування прямим контактом води з краплями фреону, заморожування непрямим контактом при теплопередачі через стінку та вакуумне заморожування. Обговорюються різні типи варіантів обробки в кожному класі з їх принципами роботи, достоїнствами і недоліками кожного процесу. Схожі порівняння різних методів наводяться в [5].

Систему непрямого контакту можна класифікувати на ті, що охолоджуються всередині та ті, що охолоджуються зовні. Кристалізатори з внутрішнім охолодженням можна додатково розділити на систему зростання статичного шару (при нерухомій рідині), шару кристалізації на обертовому барабані, блок прогресивної кристалізації, систему зростання динамічного шару (при течії води) та процеси кристалізації суспензії і розділення її в сепараційному пристрої.

У разі прямого заморожування холодоагент у рідкій формі під тиском розпилюється через форсунку в рідину продукту, де він випаровується при нижчому тиску. Таке випаровування забезпечує охолоджуючий ефект і викликає утворення кристалів льоду та/або розчиненої речовини всередині продукту. Успішне проектування установки для прямого контактного заморожування опріснення істотно залежить від її термодинамічних, хімічних та фізичних властивостей та вартості.

У непрямих контактних процесах FM теплова енергія для охолодження проходить через стінки певної форми теплообмінника. У процесі вакуумного заморожування FM вода сама може служити холодоагентом. Кожна система має свої переваги та недоліки. У процесі з вакуумом компресор повинен стискувати дуже великий об'єм водяної пари низької щільності через дуже низький тиск (0,61кПа) пари води. При вакуумному заморожуванні можна повністю уникнути прямого контакту з холодоагентом.

Основним недоліком прямого циклу FM є те, що вода може містити надмірну кількість летких холодоагентів, що в більшості випадків небажано. Також непросто відокремити холодоагент через утворення гідратів. У разі непрямого процесів FM, цих гідратів можна було б уникнути, але процес є більш складним.

Вибір технології зазвичай ґрунтується на якості продукції, економічній ефективності, вартості енергії, початкових інвестиціях та складності процесу. Основні фактори, що впливають використання процесу FM - це капітальні витрати та складність процесу. Це чітко видно з широкого спектра варіантів, методів та обладнання, наявних у сучасних умовах.

Опріснення непрямим заморожуванням зразків морської води взятої біля пляжу Умлуж [3] (TDS 40,916 мг/л), Червоне море, у Саудівській Аравії, досліджувалося в лабораторних умовах. Досліджено вплив кінетичних параметрів, включаючи ступінь кристалізації, цикли заморожування - заморожування та поступове плавлення на TDS та відокремлення солі. Тала вода, що отримана шляхом проведення одного циклу FM, має в два рази меншу концентрацію солі, ніж початкова морська вода, тоді як у відпрацьованій воді концентрація солі в два рази більша, ніж у сировині. Після 8 циклів FM видалось 98,5% солі і отримано питну воду з TDS 610 мг/л, що має концентрації солі в 67 разів меншу ніж початкова вода червоного моря. Стінки резервуара охолоджувались з зовнішньої сторони при температурі -10°C на протязі 6-10 год.

Використовуючи 3 цикли FM у [4] отримали воду з концентрацією 1 403 мг/л при вихідній концентрації 37 650 мг/л. В різних лабораторних зразках концентрація солі змінювалась від 40 750 до 1 487 мг/л, і 33 351 до 1 345 мг/л. Це показало, що після трьох циклів FM може бути отримана питна вода задовільної якості. Заморожування води проводилось за допомогою шляхом непрямого контактного зовнішнього охолодження за допомогою морозильної камери Pars-PAMCO-FRZNF170.

Зі збільшенням концентрації солі швидкість росту кристалів зменшується при постійній температурі, і для кристалізації солоної води потрібно більше часу.

Робота [6] спрямована на розробку динамічного шарового кристалізатора, що працює періодично, для заморожування опріснення морської води. Досліди проводили з розчинами води/NaCl та зразками моря вода з Ніци, Рабату та Марселя. Пілотний кристалізатор складається з охолодженої трубки, зануреної в циліндричний резервуар з подвійною оболонкою. Розчин виливають у резервуар, а кристалізація відбувається на зовнішній поверхні трубки. Трубка являлась елементом випарника холодильної установки. Розчин переміщується шляхом бульбашок повітря.

Весь процес включає стадію заморожування, що призводить до кристалізації шару льоду та стадію плавлення, яка полягає у глибокому очищенні шару льоду шляхом розплавлення нечистих зон. Дослідження впливу робочих параметрів дозволило кількісно оцінити роль різних ключових факторів заморожування та плавлення. Три експерименти дозволили досягти солоності нижче 0,5 г/кг, що відповідає стандартам питної води. Три цикли FM займали 8 годин (5 годин для заморожування та 3 години для розплавлення). Більш висока солоність вимагала більш тривалого часу. В цілому результати показують доцільність цієї технології.

У [8] проведене схоже дослідження на [6], з використанням статичного шарового кристалізатора.

У [7] опріснення методом заморожування/відтавання проводили у автоклаві з вихідним хлоридом натрію 3,5 мас. % з урахуванням швидкості перемішування, часу заморожування та переохолодження. Переохолодження становило від 1,2 К до 4 К. Оптимальними умовами для опріснення в цій роботі були швидкість перемішування 200 об/хв-1, час заморожування 120 хв і переохолодження 3 К. Результати також показали, що хлорид натрію не можна ефективно видалється шляхом одноразового заморожування/розморожування. Максимальна ефективність видалення хлориду натрію становила 64,3 %. Запропоновано дві основні причини, що призводять до забруднення одержаної талої води методом заморожування/розморожування.

Першою причиною було неминуче прилипання сольового розчину до поверхні льоду, яке можна було легко видалити шляхом промивання дистильованою водою. Друга причина полягала в тому, що сольовий розчин був неоднорідно загорнутий в накопичений лід, який важко було видалити шляхом промивання дистильованою водою.

Метод рідинного промивання був запропонований для перевірки гіпотези, і результати відповідали двом вищезгаданим причинам. Для ефективного видалення хлориду натрію та отримання прісної води під час процесу заморожування/розморожування було запропоновано використовувати додатковий метод, такий як метод багаторазової промивної рідини.

В [9] показана можливість досягнення високої якості отриманої води шляхом непрямого заморожування за одну стадію процесу при поєднанні етапів заморожування та плавленням.

Дослідження [10] проводилося при використанні теплоізолюваного резервуару. Очевидно процес замерзання води мав місце навіть при температурах вище 0 мабуть через випромінювання теплоти у космос у нічний час при безхмарному небі. Показано що більш тонкий шар льоду мав більшу солоність. У

більш широкомому масштабі схоже дослідження виконано в [12]. Використані залізобетонні тази, теплоізоляовані природними матеріалами. Також показано що воду можна кристалізувати при температурах трохи вище 0°C вночі. При плавленні льоду слід видалити перші 20% талої води, що включаються в себе багато солі, а решту можна використовувати для подальшого опріснення.

У [11] розглядався процес видалення відцентровими силами та гравітаційним відстоюванням. Оцінено новий метод опріснення заморожуванням з використанням переохолодженої води динамічного виготовлення льоду. Запропонований метод мав теоретичне споживання енергії лише 58% від необхідного для непрямого прогресуючого контактного замерзання (PCSF). За допомогою гравітаційної фільтрації розділення отриманої суміші льод-вода протягом 20 хв або відцентрового зневоднення протягом 1 хв досягали стандарту вмісту солі 0,5 % для прісної води та 60 % виходу прісної води. Крім того, методом були отримані кристали льоду з мінімальними домішками, після того як розсіл, прикріплений до поверхні, видалили шляхом відцентрового зневоднення, досягнуто стандартного вмісту солі 0,05% для питної води.

Дослідження [13] показало, що можна використовувати отриману за рахунок кристалізації теплоту для створення конвективного потоку повітря, яке приводить в рух вітрову турбіну. Вода розбризувалась з висоти 200м.

В [14] південно-африканській республіці проведені дослідження для використання холоду що виділяється при плавленні льоду для охолодження шахт. Таким чином можна отримати прісну воду і кондиціонувати повітря.

Автори [15] розглянули можливість застосування теплового насосу (ТН) як для заморожування води так і для її плавлення шляхом реверсування ТН.

У роботі [16] досліджена кристалізація при гравітаційній течії плівки солоної води і заморожування в ємностях. Також проведено аналіз комбінованого використання згаданих методів.

В [17] Національному технічному університеті «Київській політехнічній інститут імені Ігоря Сікорського проведені дослідження заморожування прісної води прямим контактом холодного повітря з півкою води що тече по поверхні бурульок, які утворюються на спеціальних насадках. Показано, що така технологія доцільна при наявності холодного повітря з температурами нижче -2 - -3°C. Отримано залежності для розрахунку маси льоду віднесеної до довжини горизонтальних чи нахилених насадок.

Крім того, використання бурульок зменшує число технологічних операцій по видаленню льоду і зменшує капіталовкладення в порівнянні з заморожуванням води в ємностях.

**Мета та завдання.** Метою даної роботи є експериментальне дослідження процесу кристалізації солоної води в бурульках. Процес опріснення солоної води з використанням її замерзання в бурульках, наскільки нам відомо, раніше не досліджувався.

**Завдання:** Вивчити вплив початкової солоності та витрати води на процеси опріснення і її кристалізації. Для вирішення задач дослідження було виготовлено експериментальну установку.

**Експериментальна установка.** Розроблена експериментальна установка висотою 2 м, в плані має розміри по 0,7 м. Зверху установки закріплені дві дерев'яні підставки з відстанню між ними. На них встановлювалась ємність з солоною водою, що мала по центру в її дні отвір для витікання води.

З метою регулювання витрати отвори мали різний діаметр. Зовнішня поверхня ємності покрита теплоізоляцією щоб запобігти замерзання води в отворі. Встановлено дерев'яна пластина шириною 50 мм призначена для подрібнення води ударом об її поверхню. Пластина встановлена на відстані 0,4 м від дна ємності.

Під пластиною, на відстані 0,3 м встановлені 3 дерев'яні горизонтальні насадки круглого перерізу діаметром 50 мм. Під ними встановлені 6 натягнутих дротяних насадок по всьому периметру діаметрами 3-5мм. Різний розмір насадок взятий для того, щоб розглянути вплив діаметра, який впливає на процеси формування бурульок [17].

В нижній частині каркасу встановлена ємність для збирання незамерзлої солоної води, що стікає з поверхні бурульок. Загальний вигляд установки зображений на фото (Рис 1).

**Методика досліджень.** Досліди проводились при температурі повітря -5°C - -15°C при різних концентраціях кухонної солі (NaCl) в водопровідній воді. Для того щоб підтримувати рівень вихідної води в резервуарі, для забезпечення однакової витрати в досліді періодично через 5-10 хв додавався свіжий розчин, причому рівень води змінювався не більше ніж на 5-10 мм. Рівень води складав біля 200 мм. Витрата води складала 1 і 2 мл/с. Вода розбризувалась від удару об тверду поверхню, після чого краплі потрапляли на насадки. Із збільшенням діаметра бурульки збільшувалась площа на яку попадали краплі і відповідно автоматично збільшувалась витрата води на поверхні бурульок при зростанні їх довжини.

З метою вивчення впливу довжини бурульок на солоність отриманої води, бурульки поділялися на рівні частини довжиною по 100 мм кожна. Після чого різні частини були розплавлені при кімнатній температурі в окремих ємностях. Використовувались розчини з початковою концентрацією солі 30, 20 та 10 г/л. Отримані відрізки бурульок перед плавленням промивались чистою холодною водопровідною водою, яку попередньо охолоджували до температури +1-+2°C, для того щоб вона не плавила лід.



Рисунок 1 - Дослідна установка

**Методика вимірювання.** Аналіз води проводився електролітичним методом, за допомогою TDS-3. Також солоність вимірювали за допомогою аерометра (по густині води). Температура повітря вимірювалась термометром. Довжина бурульок вимірювалась рулеткою.

**Результати досліджень.** Попередній аналіз показав, що короткі і тонкі бурульки мають більшу солоність ніж товсті і довгі. Подальші дослідження проводились на бурульках довжиною 300-500 мм. Основа бурульок — це лід, що нагромаджується навколо дроту або дерев'яних насадок. Довжина бурульок отриманих протягом темної пори доби з 18-00 до 02-00 ночі змінювалась в залежності від температури повітря. Результати експериментів показані на графіках Рис.2 та Рис.3, на яких представлені залежності солоності отриманої води від довжини бурульок.

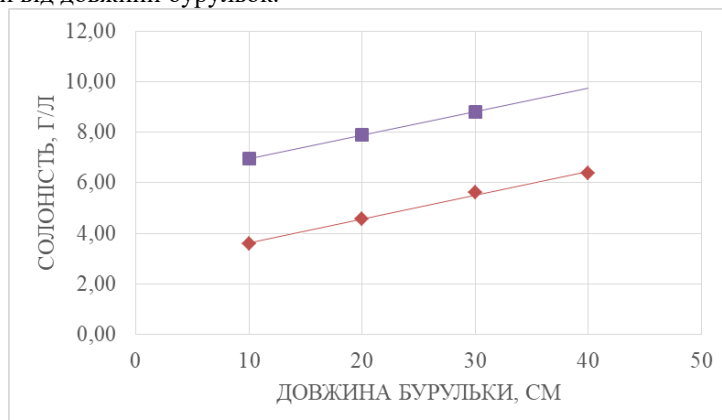


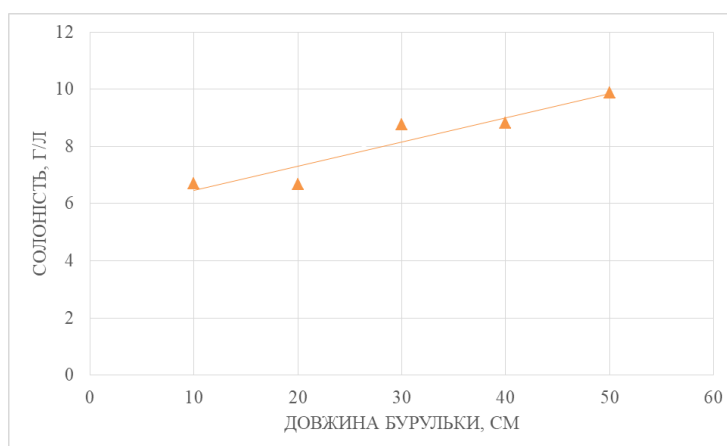
Рисунок 2 - Опріснення води при різній початковій солоності. Початкова солоність: ромб - 10г/л, квадрат - 20г/л.

На рис 2. Показана залежність концентрації отриманої води від довжини при витратах вихідної води 10 г/л та 20 г/л. Експерименти для цих початкових концентрацій проводились

на витраті солоної води 2 мл/с. Слід відзначити, що при такій витраті бурульки в довжину зростали повільно, через те що на їх кінцях часто відривалися краплі які не встигали замерзати. Максимальна довжина бурульок складала 400 мм при солоності 10 г/л та 300 мм при солоності 20 г/л. Різна довжина бурульок пояснюється різною температурою навколишнього повітря, оскільки досліди проводились в різні дні.

Як видно з графіків солоність отриманої води менша біля насадок і збільшувалась по довжині бурульок. Наприклад при початковій солоності води 10г/л у верхній частині солоність отриманої води складала 3,6 г/л а в нижній 6,4 г/л.

На рис 3. Показана залежність концентрації отриманої води від довжини при витраті вихідної води 1 мл/с. При такій витраті води утворились бурульки більших розмірів. При витраті води в 1 мл/с ступінь опріснення, яких розглядається нижче набагато більший ніж при витраті 2 мл/с. Мабуть через те що плівка на поверхні бурульки значно тонша і її термічний опір менший.

Рисунок 3 - *Опріснення води при початковій солоності: 30г/л.*

Ступінь опріснення води визначається за залежністю

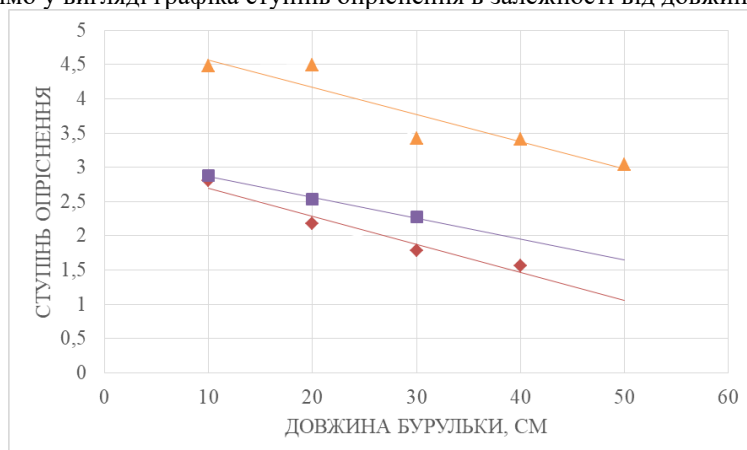
$$C = Kп / Kк,$$

де  $Kп$  – початкова солоність,

$Kк$  – кінцева (отримана) солоність по виділених окремим ділянкам.

Ми не мали можливості визначити початкову концентрацію для наступних відрізків крім першої ділянки, тому умовно початкову концентрацію для наступних ділянок крім першої віднесено до початкової загальної концентрації. На кожну наступну ділянку розчин приходить більш солоним. Тому фактична ступінь опріснення є більшою ніж показана на Рис. 4 для наступних після першого відрізків.

На Рис. 4 зобразимо у вигляді графіка ступінь опріснення в залежності від довжини бурульки.

Рисунок 4 - *Ступінь опріснення при різних початкових солоностях на різних довжинах бурульок.*

Початкова солоність: ромб - 10г/л, квадрат - 20г/л, трикутник – 30 г/л.

На жаль маса кожного відрізка не фіксувалась. Обчисливши середню солоність по довжині бурульок для трьох випадків отримаємо: 8,16 г/л при початковій витраті 30 г/л, 7,88 при 20 г/л, 5,03 при 10 г/л. Середня солоність по довжині є вищою ніж середня з урахуванням мас окремих відрізків, враховуючи що в основі бурульки мають більшу товщину. В подальшому будуть проведені відповідні дослідження.

Як видно з отриманих даних одного циклу опріснення розглянутим методом недостатньо для отримання прісної води. Цей метод дозволяє зменшити солоність від 30 г/л до 6,7 г/л.

При меншій витраті ступінь очищення більша.

Можливе комбінування опріснення кристалізацією в бурульках з технологією опріснення методом зворотнього осмосу або іншими методами. Відомо що при високих концентраціях солі в вихідній воді мембрани що використовують в зворотньому осмосі служать менший термін.

#### Висновки

1. Ефективність опріснення при витраті 1 мл/с набагато вища ніж при витратах 2 мл/с.
2. Ступінь опріснення змінюється для вибраних відрізків бурульок від 1,5 до 4, більші значення мають при витраті 1 мл/с, та на перших відрізках.
3. Залежність солоності отриманої води від довжини бурульки має прямолінійний характер.
4. Проведені експерименти показали що для отримання питної води слід проводити декілька циклів FM так як це показано в цитованих джерелах.

5. Представляється доцільним поєднання технології опріснення заморожуванням з технологією зворотнього осмосу, де використовуються спеціальні мембрани.

**Список використаної літератури:**

1. Giorgio Nebbia and Gabriella Nebbia Menozzi «Early experiments on water desalination by freezing». – University Bari, Italy. Desalination, 5 (1968) p. 49-54.
2. Z. Lu and L. Xu «Freezing desalination process». - Department of Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, China, 27 May 2015
3. Sayed M. Badawy «Laboratory freezing desalination of seawater» - Taylor & Francis, 01.06.2015. p. 1-8.
4. Mokhtar Mahdavi, Amir Hossein Mahvi, Simin Nasser, Masoud Yunesian «Application of Freezing to the Desalination of Saline Water» - King Fahd University of Petroleum and Minerals 2011, 21 October 2011. p. 1171–1177.
5. Mohammad Shafiur Rahman a , Mushtaque Ahmed a & X. Dong Chen «Freezing-Melting Process and Desalination: I.Review of the State-of-the-Art». - College of Agricultural and Marine Sciences, Sultan Qaboos University, Al Khod, Sultanate of Oman, Department of Chemical and Materials Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand
6. Anouar Rich, Youssef Mandri, Denis Mangin, Alain Rivoire, Souad Abderafi, Christine Bebon, Naoual Semlali, Jean-Paul Klein, Tijani Bounahmidi, Ahmed Bouhaouss, Ste'phane Veessler «Sea water desalination by dynamic layer melt crystallization: Parametric study of the freezing and sweating steps», - Journal of Crystal Growth 342 (2012) 110–116
7. Jun Chen, Jianjian Wu, Jiafeng XU, Qing Yuan, Bin Deng, Changzhong Chen, Zhi Li «Experiments and insights of desalination by a freezing/thawing method at low subcooling» - Chinese Journal of Chemical Engineering, 3 January 2020
8. Anouar Rich, Youssef Mandri, Nourimane Bendaoud, Denis Mangin, Souad Abderafi «Freezing desalination of sea water in a static layer crystallizer» - Desalination and Water Treatment . Taylor & Francis. 3 May 2009
9. Youssef Mandri, Anouar Rich, Denis Mangin, Souad Abderafi, Christine Bebon, Naoual Semlali, Jean-Paul Klein, Tijani Bounahmidi, Ahmed Bouhaouss. «Parametric study of the sweating step in the seawater desalination process by indirect freezing»
10. Phillip C. Wankat «Desalination by natural freezing» - School of Chemical Engineering. Purdue University, Lafayette, Ind. 47937 (U.S.A.) October 9, 1972. p. 147-157.
11. Dong Chen, Chaosheng Zhang, Hongwei Rong, Chunhai Wei, Siyu Gou. Experimental study on seawater desalination through supercooled water dynamic ice making / Guangzhou University, Guangzhou - 2020 - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114233>
12. J. Fournier, J. I. Grange, S. Vergara «Water desalination by natural freezing» - University of Chile and Ministry of Public Works, Santiago (Chile) 9 May 1974, p 167-175.
13. Yang Liu, Tingzhen Minga, Yongjia Wu, Renaud de Richter, Yueping Fang, Nan Zhou «Desalination of seawater by spray freezing in a natural draft tower» - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114700>
14. R.D.C. SHONE «The freeze desalination of mine waters» - Journal of the south african institute of mining and metallurgy, April 1987, p 107-112,
15. Ahmed A.A. «New proposed system for freeze water desalination using auto reversed R-22 vapor compression heat pump» - Mechanical Engineering Department, Benha University, Faculty of Engineering at Shoubra, 108 Shoubra Street, Cairo, Egypt, 7 October 2009, p. 179-184.
16. A. Zambrano, Y. Ruiz, E. Hernández, M. Raventós, F.L. Moreno «Freeze desalination by the integration of falling film and block freezeconcentration techniques» - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.015>
17. I. I. Pukhovoi, A. M. Postolenko «Ice formation in the form of icicles and utilization of heat of crystallization for air heating» - Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 91, No. 3, May, 2018.

**I. Puhoviy**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0003-4915-9699

**A. Petrechuk**, PhD. Student, ORCID 0000-0003-4422-7365

**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
WATER DESALINATION USING ICE FREEZING IN ICICLES**

*The aim of the study is to investigate the effect of initial salinity and water flow rate on desalination processes in icicles formed on horizontal nozzles.*

*Experimental installation, is a frame on which are fixed: a container with initial salt water, impact surface, horizontal nozzles. Initial saline water of 10-30 g/l flowed out through the hole, fell and crushed against the impact surface, and then froze on the nozzles in the form of icicles. To investigate the degree of salinity, the icicles were divided into equal parts and melted.*

*The results of the investigation show that the obtained water contains the most salts in those parts that are closer to the bases of the borules. At a flow rate of 2 ml/sec, the borules grew to their full length. The level of the option was defined as the ratio of initial water solubility to the received solubility and was 1.5 to 4, higher values were obtained at the flow rate of 1 ml/sec, and at the first intervals.*

*Conclusions: The results of experiments showed that it is impossible to refine brackish water in 1 cycle. To obtain drinking water with salt concentration less than 0.5 g/l it is necessary to use several cycles of freezing-melting or to combine with other methods of desalination. It is necessary to control the optimum water consumption to ensure a higher degree of (solidification)desalination.*

**Key words:** *freezing desalination, icicles, salinity, impact surface, crystallization, salt water consumption.*

#### References

1. Giorgio Nebbia and Gabriella Nebbia Menozzi «Early experiments on water desalination by freezing». – University Bari, Italy. Desolination, 5 (1968) p. 49-54.
2. Z. Lu and L. Xu «Freezing desalination process». - Department of Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, China, 27 May 2015
3. Sayed M. Badawy «Laboratory freezing desalination of seawater» - Taylor & Francis, 01.06.2015. p. 1-8.
4. Mokhtar Mahdavi, Amir Hossein Mahvi, Simin Nasser, Masoud Yunesian «Application of Freezing to the Desalination of Saline Water» - King Fahd University of Petroleum and Minerals 2011, 21 October 2011. p. 1171–1177.
5. Mohammad Shafiur Rahman a , Mushtaque Ahmed a & X. Dong Chen «Freezing-Melting Process and Desalination: I. Review of the State-of-the-Art». - College of Agricultural and Marine Sciences, Sultan Qaboos University, Al Khod, Sultanate of Oman, Department of Chemical and Materials Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand
6. Anouar Rich, Youssef Mandri, Denis Mangin, Alain Rivoire, Souad Abderafi, Christine Bebon, Naoual Semlali, Jean-Paul Klein, Tijani Bounahmidi, Ahmed Bouhaouss, Stéphane Veesler «Sea water desalination by dynamic layer melt crystallization: Parametric study of the freezing and sweating steps», - Journal of Crystal Growth 342 (2012) 110–116
7. Jun Chen, Jianjian Wu, Jiafeng XU, Qing Yuan, Bin Deng, Changzhong Chen, Zhi Li «Experiments and insights of desalination by a freezing/thawing method at low subcooling» - Chinese Journal of Chemical Engineering, 3 January 2020
8. Anouar Rich, Youssef Mandri, Nourimane Bendaoud, Denis Mangin, Souad Abderafi «Freezing desalination of sea water in a static layer crystallizer» - Desalination and Water Treatment . Taylor & Francis. 3 May 2009
9. Youssef Mandri, Anouar Rich, Denis Mangin, Souad Abderafi, Christine Bebon, Naoual Semlali, Jean-Paul Klein, Tijani Bounahmidi, Ahmed Bouhaouss. «Parametric study of the sweating step in the seawater desalination process by indirect freezing»
10. Phillip C. Wankat «Desalination by natural freezing» - School of Chemical Engineering. Purdue University, Lafayette, Ind. 47937 (U.S.A.) October 9, 1972. p. 147-157.
11. Dong Chen, Chaosheng Zhang, Hongwei Rong, Chunhai Wei, Siyu Gou. Experimental study on seawater desalination through supercooled water dynamic ice making / Guangzhou University, Guangzhou - 2020 - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114233>
12. J. Fournier, J. I. Grange, S. Vergara «Water desalination by natural freezing» - University of Chile and Ministry of Public Works, Santiago (Chile) 9 May 1974, p 167-175.
13. Yang Liu, Tingzhen Ming, Yongjia Wu, Renaud de Richter, Yueping Fang, Nan Zhou «Desalination of seawater by spray freezing in a natural draft tower» - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114700>
14. R.D.C. SHONE «The freeze desalination of mine waters» - Journal of the south african institute of mining and metallurgy, April 1987, p 107-112,
15. Ahmed A.A. «New proposed system for freeze water desalination using auto reversed R-22 vapor compression heat pump» - Mechanical Engineering Department, Benha University, Faculty of Engineering at Shoubra, 108 Shoubra Street, Cairo, Egypt, 7 October 2009, p. 179-184.
16. A. Zambrano, Y. Ruiz, E. Hernández, M. Raventós, F.L. Moreno «Freeze desalination by the integration of falling film and block freezeconcentration techniques» - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.015>
17. I. I. Pukhovoi, A. M. Postolenko «Ice formation in the form of icicles and utilization of heat of crystallization for air heating» - Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 91, No. 3, May, 2018.

Надійшла 15.09.2021

Received 15.09.2021