

УДК 628.161.087.9:621.8.03–027.236

## ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПОЛІВ НА ПОРИСТІСТЬ БЛОКУ ЛЬОДУ В УСТАНОВКАХ БЛОЧНОГО ВИМОРОЖУВАННЯ

Орловська Ю.В., аспірант,\*

Трач О.Р., магістр

Одеська національна академія харчових технологій

Тел.(048) 712-41-01

**Анотація** – робота присвячена дослідженню впливу ультразвукових полів різної частоти та інтенсивності на пористість блоку льоду в установках блочного виморожування.

**Ключові слова** – ультразвук, очищення води, виморожування, енергоефективність, пористість, інтенсифікація.

*Формулювання проблеми.* Якість прісної води має велике значення для людини і її господарської діяльності. Лише одна сота частка усіх світових ресурсів прісних вод може бути основним джерелом водопостачання людства. Щорічно в світі витрачається 5000 км<sup>3</sup> прісної води, або 11% річного стоку усіх річок світу. Доступні природні ресурси прісної води вкрай нерівномірно розміщені на нашій планеті, значна частина найбільших річок світу протікає у малонаселених регіонах. У густонаселених областях відносно небагато великих річок і їх води інтенсивно використовуються. Усе це ускладнює водопостачання людства, на поточний момент приблизно одна третина населення Землі відчуває дефіцит прісної води [1,2,3].

До 2025 року в зв'язку з ростом чисельності населення ситуація істотно погіршиться. Такі перспективи значно підвищують важливість отримання очищеної води. До цього часу основним методом очищення води залишається її дистиляція, проте енергетична ефективність такого методу не надто висока. У зв'язку з цим широко поширюються альтернативні способи очищення води.

*Аналіз останніх досліджень.* Як показує аналіз літературних даних [4,5,6] проблема підвищення енергоефективності очищення води поки що не вирішена в повній мірі. Серед альтернативних опріснювальних систем планомірно підвищується інтерес до низькотемпературних технологій водопідготовки. Це пов'язано з їх високою енергоефективністю, оскільки для перетворення води в пар до неї потрібно підвести 2252 кДж/кг тепла, а для перетворення води в лід (виморожування) необхідно відвести 335 кДж/кг тепла. Тобто, витрати енергії на утворення льоду в 6,7 рази менші витрат енергії на

---

© Орловська Ю.В., аспірант, Трач О.Р., магістр

\* Науковий керівник – д.т.н., професор Терзієв С.Г.

випаровування. Найбільш привабливими виглядають кристалізатори неперервної дії, що пов'язано з наявністю відпрацьованих методів проектування та промислового процесу. Проте, висока механічна складність і високі витрати на впровадження роблять установки неперервної кристалізації занадто дорогими для систем дрібномасштабного очищення води. У такій ситуації можна використовувати установки, побудовані на принципі блочного виморожування. Для установок цього типу характерні простота конструкції, компактність та енергетична ефективність. Принцип блочного виморожування усуває системні втрати холоду, які характерні для традиційних установок криоконцентрування.

Як відомо, якість процесу прямо залежить від якості управління ним, внаслідок цього важливе значення отримує вирішення проблеми якісного управління процесами теплопередачі при направленій кристалізації. Виходячи з вищесказаного та опираючись на Закон України «Про енергозбереження»[7] дослідження методик управління процесом теплопередачі при направленій кристалізації представляє велике наукове і практичне значення для вирішення проблем забезпечення чистою водою[8,9].

*Формулювання цілей дослідження.* Розглянемо фізику процесу виморожування на прикладі установки блочного типу[10].

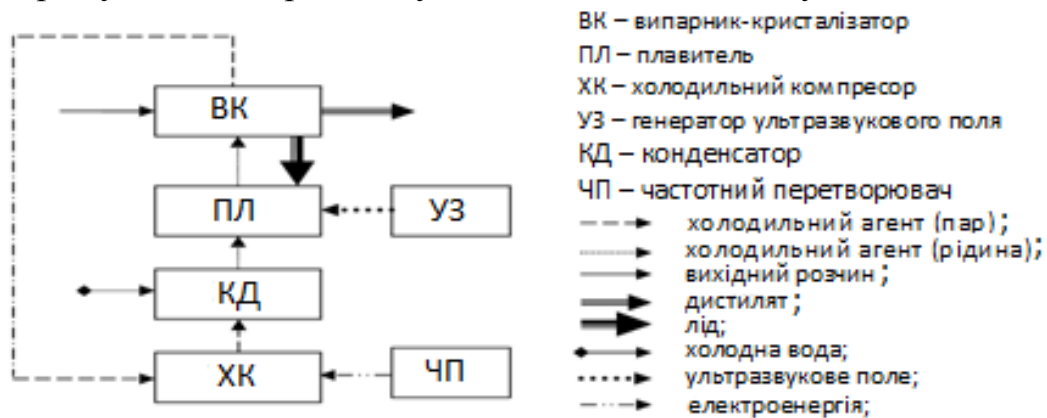


Рис. 1. Апаратурно-процесова схема установки блочного виморожування.

Апаратурно-процесова схема роботи системи представлена на рис. 1. З розчину на кристалізаторах формується блок кристалів льоду, після чого розчин, що залишився, видаляється з концентрату. Утворений блок льоду відокремлюється від кристалізатора та проходить етап гравітаційного сепарування. Нетривалий процес відтаювання супроводжується плавленням тонкого поверхневого шару блока, вода, що утворилася внаслідок цього процесу, змиває розчин солі з поверхні блока та капілярних об'ємів. Після цього проводиться розплавлення льоду та отримується очищена вода. Дослідження методик управління процесом теплопередачі при

спрямованій кристалізації та досягнення максимальної енергоефективності цього процесу має велике наукове і практичне значення для вирішення проблем забезпечення чистою водою. Дослідження процесу теплопередачі в реальних умовах пов'язане з великими труднощами, оскільки процеси, що виникають при виморожуванні, є складними та нестационарними. Через це важливими стають теоретичний аналіз і побудова моделей. У даній роботі розглянемо деякі підходи до вивчення та моделювання процесу виморожування, можливі принципи впливу пористості на цей процес та вплив ультразвукового поля на підвищення енергоефективності процесу.

*Основна частина.* При направленій кристалізації на горизонтальній поверхні 1, температура якої нижче кріоскопічної температури, формується підкладка у вигляді твердої фази 2. Нижче зростає двофазний шар 3, що складається з льоду і розчину. Поверхню двофазової зони і розчин 5 розділяє приграничний шар 4.

Управління процесом направленої кристалізації базується на забезпеченні необхідних умов формування двофазного шару. Густина теплового потоку і масовий потік льоду визначають різницю температур розчину і поверхні 1. Складність моделювання процесів за схемою (рис.2) обумовлюється не тільки фазовими переходами, а й зміною структури двофазного шару по висоті.

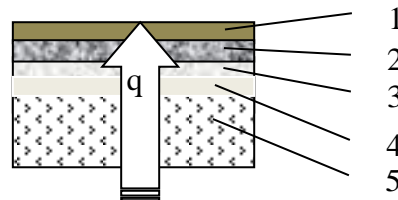


Рис. 2. Фізична модель процесу виморожування.

В ідеальному теплофізичному представленні процес направленої кристалізації повинен призводити до появи двофазної зони з нульовою пористістю. Такий консервативний спосіб управління процесом повинен протікати при мінімальній різниці температур, практично при кріоскопічній температурі. Теоретично це дозволить забезпечити нульова пористість, проте швидкість формування блока льоду буде нескінченно низькою. Використання будь-яких методів інтенсифікації призводить до зростання швидкості наморожування, та відбувається це ціною отримання пористої структури. Слід зауважити, що зі збільшенням глибини шару при усіх інших незмінних параметрах пористість зростає. Відповідно зростає термічний опір двофазного шару, знижується інтенсивність формування блока льоду, погіршується якість поділу розчину. Оскільки аналітична модель процесу є досить складною[11], логічним

здається провести чисельне моделювання процесу кристалізації, а також представити концентраційне і температурне поля у твердій фазі двофазного шару.

На рисунку 3 представлені результати числового моделювання зміни температури  $\Delta t$  протягом процесу кристалізації при наступних значеннях змінних: товщина двофазного шару  $h$  змінюється від 0 до 6 см (з кроком 0,5 см), пористість двофазного шару  $\epsilon$  змінюється від 0 до 1.

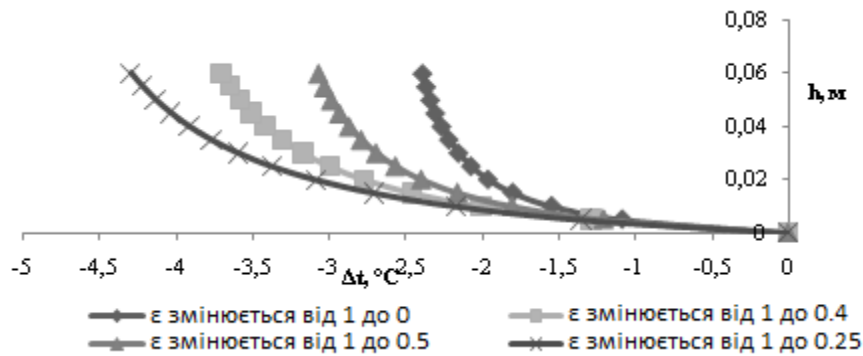
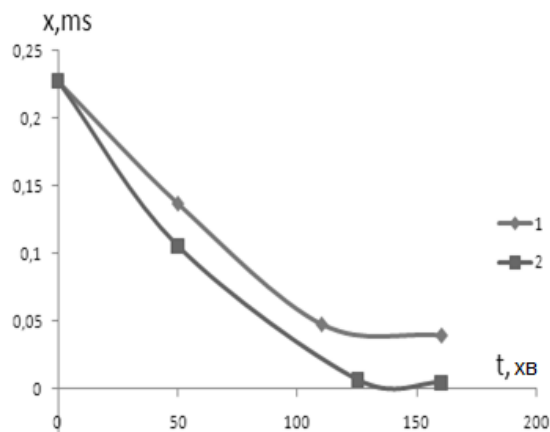


Рис. 3. Графіки залежності  $\Delta t(h)$  при  $\epsilon$ , що змінюється по лінійному закону.

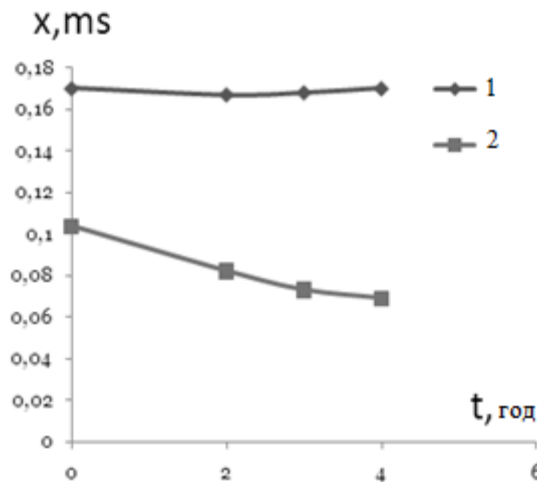
Виходячи з результатів математичного моделювання[12], пористість має значний вплив на тепло- і масообмін у процесах кристалізації і сепарування. Була сформульована гіпотеза, що організація вищезазначених процесів в умовах впливу ультразвукового поля сприятиме більш щільній упаковці кристалів льоду в блоці, а, отже, призведе до зменшення пористості, що, в свою чергу, повинно призвести до більш якісного поділу розчину та підвищення енергетичної ефективності очищення води.

За допомогою блокової виморожуючої установки з ультразвуковим генератором був проведений ряд дослідів по вивченню впливу ультразвукового випромінювача на фізичні параметри процесу блочного виморожування (рис. 4,5).



1 – без ультразвуку, 2 – з застосуванням ультразвуку.

Рис. 4. Вплив ультразвуку на солемісткість у стоках.



1 – без ультразвуку, 2 – з застосуванням ультразвуку.

Рис. 5. Вплив ультразвукового інтенсифікатора на зміну концентрації солі у блоці льоду з плином часу.

Шляхом вирішення рівнянь матеріального балансу була отримана формула для знаходження концентрації солі в блоці льоду

$$X(\tau) = \frac{M_H X_H - M(\tau) X(\tau)}{M_H - M(\tau)}, \quad (1)$$

де  $M_H$  – початкова маса розчину з концентрацією солей  $X_H$ ,  
 $M(\tau)$  - поточна маса розчину з концентрацією солей  $X(\tau)$ .

Проведено дослід з визначення концентрації солей в блоці льоду із застосуванням ультразвукового інтенсифікатора і без. Отримані графіки (рис. 5) свідчать, що застосування ультразвуку знижує концентрацію солей в блоці льоду, а, отже, і його пористість. Виходячи з результатів дослідів, можна зробити висновок, що застосування ультразвукових інтенсифікаторів в установках блочного виморожування дозволяє забезпечити більш ефективний розподіл розчину, а значить отримати більш чисту воду при витратах, менших ніж для традиційних дистиляційних установок.

*Висновки.* У результаті математичного моделювання встановлено, що пористість структури льоду значно впливає на процеси тепло- і масообміну. У рамках роботи досліджено вплив ультразвуку на процес кристалізації та сепарування блока льоду. Виявлено, що застосування генераторів ультразвукового поля дозволяє забезпечити меншу концентрацію солей у стоках та твердій фазі, що обумовлюється меншим значенням пористості та більш щільною упаковкою кристалів. При цьому, слід зауважити, що низькотемпературний розподіл під впливом ультразвукових полів характеризується значно нижчими витратами енергії у порівнянні з традиційною дистиляцією.

## Література:

1. *Мидоренко, Д.А.* Мониторинг водных ресурсов: Учеб. пособие. / Д.А. Мидоренко, В.С. Краснов. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2009. – 77 с.
2. *Хвесик, М.А.* Водні ресурси – інвестиція сьогодення і перспектива майбутнього / М.А. Хвесик, В.М. Мандзик. // Інвестиції: практика та досвід. – 2009. – №1. – С. 2–8.
3. Дефицит пресной воды возглавил рейтинг глобальных рисков [Электронный ресурс] // Baker Tilly. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.bakertilly.ua/ru/news/id1113>.
4. *Prakash, S.* Water Desalination: Emerging and Existing Technologies / S. Prakash, M.A. Shannon, K. Bellman // AquaNanotechnology / S. Prakash, M.A. Shannon, K. Bellman., 2014. – С. 533–562.
5. *Мосин, О.В.* Физико-химические основы опреснения морской воды / О.В. Мосин. // Сознание и физическая реальность. – 2012. – №1. – С. 19–30.
6. *Сосновский, А.В.* К расчёту опреснения минерализованного пористого льда при таянии / А.В. Сосновский, И.И. Конторович. // Лёд и Снег. – 2016. – С. 545–554.
7. Закон України «Про енергозбереження» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>.
8. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / [В. Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков та ін.]. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.
9. *Антипов, С.Т.* Тепло - и массообмен при концентрировании жидких сред вымораживанием / С.Т. Антипов, В.Е. Добромиров, В.Ю. Овсянников. – Гос. технол. акад. Воронеж, 2004. – 208 с.
10. Техника блочного вымораживания / О.Г. Бурдо, С.И. Милинчук, В.П. Мордынский, Д.А. Харенко. – Одесса: Полиграф, 2011. – 294 с.
11. *Бурдо, О.Г.* Процессы кристаллизации воды в ультразвуковом поле / О.Г. Бурдо, Ф.А. Тришин, А.Р. Трач. // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2014. – №45. – С. 80–86.
12. *Тришин, Ф.А.* Повышение энергоэффективности процесса кристаллизации воды в ультразвуковом поле / Ф.А. Тришин, А.Р. Трач, Ю.В. Орловская. // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2017. – №81. – С. 79–84.

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ НА ПОРИСТОСТЬ  
БЛОКА ЛЬДА В УСТАНОВКАХ БЛОЧНОГО  
ВЫМОРАЖИВАНИЯ**

Орловская Ю.В., Трач А.Р.

**Аннотация – в статье изучено влияние ультразвуковых полей различной частоты и интенсивности на пористость блока льда в установках блочного вымораживания.**

**Ключевые слова – ультразвук, очистка воды, вымораживание, энергоэффективность, пористость, интенсификация.**

**THE EFFECT OF ULTRASONIC FIELDS ON THE ICE BLOCK  
POROSITY IN BLOCK FREEZING FACILITY**

Y.Orlovskaya, O. Trach

*Summary*

**The aim of this work is to study the influence of ultrasonic fields of different frequency and intensity on the porosity of the ice block in block freezing units.**