

УДК 613.1

Ю.П. Денисов

Одеська національна академія харчових технологій, 65039, вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039

ОПРИСНЕННЯ ВОДИ ВИМОРОЖУВАННЯМ

Розглянута технологія опріснення води виморожуванням із застосуванням виморожуючих установок, які дозволяють підвищити інтенсивність процесів тепло- і масообміну при кристалізації і сепарації льоду від концентрату. Для цих установок застосовуються нові типи кристалізаторів та сепараційно-промивних колон, що зменшує габарити і вагу установок і дозволяє знизити вартість опріснення води виморожуванням.

Ключеві слова: *Опріснення води – Сепараційно-промивна колона – Виморожуючі установки - Кристалізація*

The technology of water desalination through freezing using the freezing settings that allow to increase the intensity of heat and mass transfer processes during crystallization and separation of ice from concentrate. For these plants the new types of crystallizers and desalting-washings columns are used that diminish sizes and weight of plants and allow to lower the cost of water desalination are used.

Keywords: *Water desalination – Desalting-washings column – Freezing out plants – Crystallization*

I. ВСТУП

Заморожуючий метод очищення води, з погляду одержання високоякісної питної води, є найбільш перспективним методом у порівнянні з дистилляцією або зворотним осмосом, однак є й найдорожчим внаслідок більших витрат на устаткування [1].

Кристалізатори виморожуючих опріснювачів-концентраторів (ВОК) виконують у вигляді теплообмінників з поверхнею ковзання льоду. Відомі такі апарати, у яких теплота кристалізації відбирається переохолодженою рідиною [2], але їх не застосовують у зв'язку низького коефіцієнта тепловіддачі.

Удосконалювання безскребкових кристалізаторів шляхом інтенсифікації тепло- масообміну є актуальним завданням, тому що дозволяє зменшити вартість кристалізатору, а також створює передумови для виконання установки у вигляді моноблока, як на рисунку 1.

ВОК працює таким чином (короткий опис).

Вихідна вода, що підлягає очищенню, направляється насосом 4 через вхідний фільтр у кристалізатор моноблока установки 2, де із частини цієї води утворюються кристали льоду.

При цьому застосовується холодильна машина, яка в свою чергу включає компресор 1, випарник 5, конденсатор 6, терморегулюючий вентиль 7 та допоміжний конденсатор 8.

Тут нагадаємо, що, як і в природі (наприклад, при утворенні льодовиків), кристали льоду, утворюючись із молекул води, відторгають розчинені у воді речовини зі складу кристалічної решітки льоду, а потім у результаті підтавання льоду забруднювачі вимиваються з масиву льоду і віддаляються струмочками поталої води.

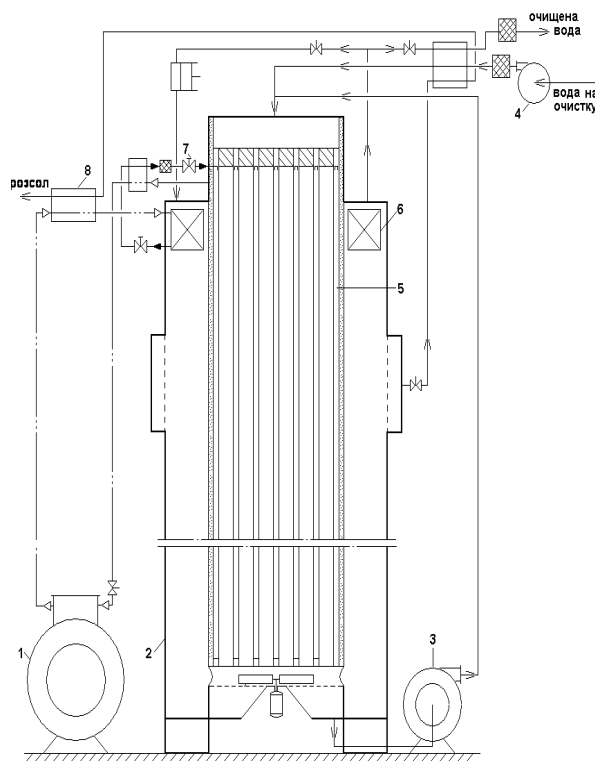


Рисунок 1 – Моноблок виморожуючої установки
1 – холодильний компресор; 2 – моноблок установки; 3, 4 – насоси; 5 – випарник; 6 – конденсатор; 7 – терморегулюючий вентиль; 8 – допоміжний конденсатор

Для утворення кристалів льоду використовується холодильна машина, випарник 5 якої виконаний у вигляді охолоджувальної сорочки кристалізатора.

Крижана суспензія, що складається із кристалів льоду і розсолу під дією перепаду тиску, створеного насосом, рухається із кристалізатору в сепараційно-промивну колону для сепарації і промивання кристалів льоду від розсолу. Причому розсіл, у міру ущільнення крижаного пористого поршня, віддаляється через дренажну сітку з установки, а ущільнений і попутно водночас промитий від розсолу лід направляєється в порожнину плавителю установки, де плавиться за рахунок тепла конденсації холодильного агента в конденсаторі 6 холодильної машини. Відзначимо, що конденсатор 6 холодильної машини виконаний у вигляді теплообмінника плавителю установки.

Одночасно рідкий холодильний агент повертається з конденсатора 6 холодильної установки через терморегульовальний вентиль 6 у випарник 5 холодильної установки, а потала вода, отримана в плавителю, виводиться з установки через вихідний фільтр споживачу. Частина поталої води 5...10 % від розплаву льоду в плавителю використовується для промивання кристалів льоду від розсолу зворотним потоком, який змішуючись із залишком розсолу в крижаному пористому поршні, виводиться через дренажну сітку з установки.

ВОК може працювати як опріснювальна установка в режимі знесолення і очищення засоленних вод або доочищення водопровідної води з одержанням високо якісної поталої води. ВОК може працювати також як концентратор рідких харчових продуктів, наприклад фруктових і овочевих соків, у першу чергу - виноградного, яблучного та цитрусових соків.

II. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ НОВИХ ВИМОРОЖУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що закручення потоку суттєво зменшує критичне число Рейнольдса, яке відповідає переходу ламінарного режиму в турбулентний [3].

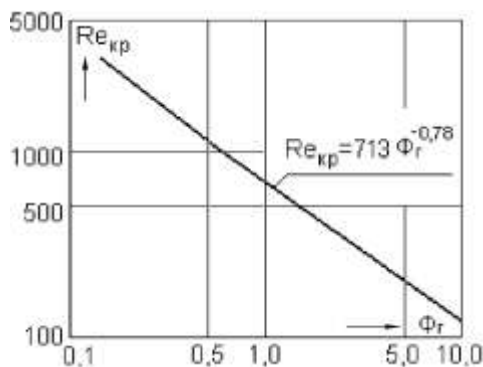


Рисунок 2 – Залежність критичного значення Рейнольдсу від розрахункового (геометричного) параметру закручення

При цьому збільшується швидкість потоку щодо поверхні каналу за рахунок появи обертальної (тангенціальній) складової і виникнення вихрів Тейлора-Гертлера в безпосередній близькості від поверхні теплообміну, різко збільшуючи коефіцієнт тепловіддачі. На рисунку 2 наведені результати досліджень по критичному числу Рейнольдса [3].

З рисунку видно, що закручення потоку в трубах приводить до різкого розширення області турбулентних плинів залежно від розрахункового (геометричного) параметру закручення Φ_r :

$$\Phi_r = \frac{\omega \cdot R \left[1 + \left(\frac{d_o}{d} \right)^2 \right]}{2 \cdot w_o}, \quad (1)$$

де ω – кутова швидкість обертання потоку рідини;
 R – радіус труби кристалізатора;
 d_o, d – внутрішній і зовнішній діаметри шнека;
 w_o – витратна швидкість рідини у трубі кристалізатору.

Виконано також патентний пошук з напрямку виморожувальні технології опріснення солоних вод або концентрування рідких харчових продуктів та створення засобів енергозбереження у цих технологіях.

Найбільш близьким до технічного рішення, що заявляється, прийнятим як прототип, є ВОК, що містить випарник-кристалізатор у вигляді кожухотрубного теплообмінника, труби якого поставлені із внутрішньої поверхні гідрофобним покриттям, а із зовнішньої – щільними розподільниками холодоагенту, колону для росту кристалів, сепараційно-промивну колону, конденсатор-плавитель, рекуперативний теплообмінник, насоси, а також холодильну установку (Патент США №4704877 від 10.11.1987 р.).

Недоліком відомого пристрою є висока вартість виморожування за рахунок великих витрат на теплообмінну поверхню з труб великої довжини, обумовленою невисоким значенням тепловіддачі в трубах кристалізатору.

В основу розробки поставлене завдання зниження вартості виморожування шляхом підвищення ефективності теплообміну при кристалізації льоду [4].

Розробка нової технології опріснення солоних вод та концентрування рідких харчових продуктів виморожуванням дозволить суттєво знизити вартість виморожування за рахунок застосування інтенсивних процесів тепло- і масообміну при кристалізації і сепарації льоду від концентрату. Останнє потребує розробки нових конструкцій таких апаратів як кристалізатор і сепараційно-промивочна колона, що є складовими елементами ВОК з новою технологією виморожування, що пропонується.

III. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОВЕРХНІ ВИПАРНИКА-КРИСТАЛІЗАТОРУ ВИМОРОЖУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Для розрахунку теплообміну на внутрішній поверхні кристалізатору з урахуванням впливу закрутки потоку застосовують поправку [3]:

$$\varepsilon_{\tau} = \left(\frac{Nu_{\tau}}{Nu_o} \right)_{Re}, \quad (2)$$

де $\varepsilon_{\tau} = 1 + 0,44 \cdot \Phi_{\Gamma}^{0,78}$.

З урахуванням (2) маємо

$$Nu_{\tau} = \varepsilon_{\tau} \cdot Nu_o, \quad (3)$$

$$\text{або } Nu_{\tau} = (1 + 0,44 \cdot \Phi_{\Gamma}^{0,78}) \cdot Nu_o, \quad (4)$$

де позначка (o) відноситься к витратним (вздовж вісі) потокам, а позначка (τ) відноситься к тангенціальному направленню потоку.

$$Nu_o = 0,0306 \cdot Re_o^{0,8} \cdot Pr^{0,43}; \quad (5)$$

$$Re_o = \frac{w_o \cdot d_{вн}}{\nu}. \quad (6)$$

Для знаходження Re_o застосовується витратна швидкість суспензії (w_o) у трубі кристалізатору з внутрішнім діаметром $d_{вн}$, а також кінематична в'язкість розсолу ν .

Таким чином число Нусельта $Nu_o = f(Re_o, Pr)$ і число Рейнольдса $Re_o = f(w_o, d_{вн}, \nu)$.

Коефіцієнт тепловіддачі від суспензії к внутрішній поверхні кристалізатору з урахуванням впливу закрутки потоку дорівнює

$$\alpha_{вн} = \alpha_{\tau} = \frac{Nu_{\tau} \cdot \lambda}{d_{вн}}. \quad (7)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від фреону R22 к поверхні кристалізатору з урахуванням кипіння фреону з плівки на зовнішній поверхні кристалізатору дорівнює [5]:

$$\alpha_3 = C \cdot q_F^{0,63} (P \cdot 10^{-5})^{0,73}, \quad (8)$$

де C – коефіцієнт, залежний від температури кипіння фреону;

q_F – щільність теплового потоку;

P – тиск кипіння фреону.

З урахуванням рівнянь (7) і (8) знаходимо коефіцієнт теплопередачі, віднесений к внутрішній поверхні труби кристалізатору:

$$K = \frac{1}{\frac{d_{вн}}{d_3 \cdot \alpha_{вн}} + \frac{d_{вн} \cdot \delta_{ст}}{d_{ср} \cdot \lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{вн}}}}, \quad (9)$$

де $d_{вн}$ – внутрішній діаметр поверхні труби;

d_3 – зовнішній діаметр поверхні труби;

$d_{ср}$ – середній діаметр поверхні труби;

$\delta_{ст}$ – товщина стінки кристалізатору;

λ – теплопровідність стінки кристалізатору.

Поверхня кристалізатору дорівнює:

$$F = \frac{Q_o}{K \cdot (t_c - t_o)}, \quad (10)$$

де Q_o – витрата холоду збоку холодильної установки до кристалізатору;

t_c, t_o – температури суспензії збоку внутрішній поверхні кристалізатору і фреону збоку зовнішньої поверхні кристалізатору.

Розрахунок поверхні кристалізатора експериментальної установки для опріснення води виморожуванням з виходом опрісненої води $G_b = 5$ л/год ($Q_o = 700$ Вт для $t_c - t_o = 5$ °С) з урахуванням цієї методики розрахунку показує, що $K = 922$ Вт/(м²·К) і $F = 0,15$ м².

IV. ВИСНОВКИ

Розробка нової технології концентрування рідких харчових продуктів виморожуванням дозволить суттєво знизити вартість концентрування виморожуванням за рахунок застосування інтенсивних процесів тепло- і масообміну при кристалізації і сепарації льоду від концентрату. Останнє потребує розробки нових конструкцій таких апаратів як кристалізатор і сепараційно-промивочна колона, що є складовими елементами виморожувального концентратора з новою технологією виморожування, що пропонується.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пап Л. Концентрирование вымораживанием. – М.: Легкая и пищевая промышленность. – 1982. – С. 96.
2. Патент США №4704877 від 10.11.1987 р.
3. Щукін В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. – М: Машиностроение, 1982, – 200 с.
4. Патент України «Вымораживающий опреснитель», №90215 от 12.04.10 г., Бюл. № 7, 2010 г., авторы: Денисов Ю.П., Смирнов Л.Ф.
5. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности/ Г.Н. Данилова и др.– М.:Агропромиздат, 1986 – 288 с.

Получена в редакции 18.03.2013, принята к печати 20.03.2013