

Авторефер
X 20

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ХАРЕНКО ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

Д Харенко

УДК 664.012.3:005.584.1.

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПРИ БЛОКОВОМУ
ВИМОРОЖУВАННІ ВОДИ ІЗ ХАРЧОВИХ РОЗЧИНІВ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних
та фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса-2013

Ск

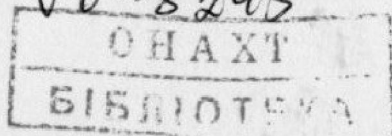
Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Бурдо Олег Григорович, Одеська національна
академія харчових технологій, кафедра процесів,
апаратів та енергетичного менеджменту, завідувач
кафедри.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор
заслужений працівник вищої школи України
Малежик Іван Федорович, Національний
університет харчових технологій, кафедра процесів
і апаратів харчових виробництв, професор кафедри.

- доктор технічних наук, професор
Потапов Володимир Олексійович, Харківський
державний університет харчування та торгівлі,
завідувач кафедри.



Захист відбудеться 22 листопада 2013 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: 65039, м.Одеса, вул. Канатна, 112, ауд. А-234.

Зберігати у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112.

ОНАХТ Автореф
Інтенсифікація тепло



v018245

Г.І. Палвашова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Актуальним завданням розвитку харчової промисловості на сучасному етапі є створення і впровадження прогресивної техніки для переробки сільськогосподарської сировини. Такі технології повинні забезпечити високу якість продукції, що випускається, та підвищення економічної ефективності виробництва. У першу чергу це відноситься до харчових продуктів, що містять термолабільні компоненти, зберегти якість яких при термічній обробці неможливо через значні втрати їхніх смакових, харчових і колірних показників.

На сьогодні високоякісні українські продукти не можуть конкурувати на світовому ринку через значну технологічну енергоємність, яка в 2-4 рази вища, ніж у розвинених країнах. Часто ключовим процесом, який визначає як якість, так і вартість готового продукту, є зневоднення рідин. Такі завдання лежать в основі виробництва харчових концентратів. Як правило, харчові концентрати отримують, видаляючи з них частину води. В Україні при виробництві концентратів щорічно випаровується близько 1-1,5 млн. т. води, що в грошовому еквіваленті становить 300-400 млн. грн. При цьому якість готового продукту не відповідає сучасним вимогам. Все це не дозволяє Україні використовувати повною мірою значний потенціал виробництва харчових продуктів.

Комплексові сучасних вимог відповідає метод блокового виморожування, розроблений в ОНАХТ, основною відмінністю якого є формування блоку льоду на стадії кристалізації. Це спрощує конструкцію установки і знижує рівень енергетичних витрат. Успішна апробація технології в різних напрямках харчових виробництв визначає необхідність переходу від лабораторних зразків техніки блочного виморожування до установок безперервної дії з високою інтенсивністю процесів розділення розчинів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі процесів, апаратів та енергетичного менеджменту Одеської національної академії харчових технологій. Дослідження проводилися в рамках держбюджетної тематики науково-дослідних робіт «Удосконалення кріотехнологій та обладнання для концентрування і фракціонування харчових рідин» (№ держреєстрації 0197U016064) і «Розробка стратегії, принципів та методології удосконалення енерготехнологій АПК» (№ держреєстрації 0100U004572).

Мета і завдання досліджень. У дисертаційній роботі поставлена мета: розробити методику розрахунку і енергетично ефективно обладнання для концентрування рідких харчових продуктів методом блокового виморожування, яке б забезпечило більшу продуктивність у безперервному режимі роботи, високоінтенсивні процеси поділу розчинів і низькі енергетичні витрати.

Поставлена мета визначила і загальну спрямованість наукових досліджень:

1. Розробити модель процесу кристалізації води з розчину в умовах роботи зовнішніх засобів інтенсифікації тепломасообмінних процесів кріоконцентрування методом блокового виморожування.

2. Встановити структури критеріальних рівнянь, що враховують специфіку кристалізації в полі механічних впливів. Визначити завдання експериментальних досліджень комбінованих процесів тепло - і масопереносу.

3. Встановити рівень впливу конструктивних і режимних параметрів на динаміку зростання блоку льоду, на його структуру і структуру одержуваного концентрату. Встановити вплив конструктивних і режимних параметрів на енергетичні характеристики обладнання.

4. Встановити ефективність різних способів (механічних, акустичних) впливу на приграничний шар системи «лід - розчин» у процесі блокового виморожування.

5. Вивести в критеріальній формі рівняння для розрахунку тепломасообмінних процесів в умовах використання різних інтенсифікаторів. Створити інженерну методику розрахунку та оптимізації такого обладнання.

6. Розробити методику та створити програму розрахунку на ЕОМ процесів концентрування при блочному виморожуванні цукрових розчинів в умовах функціонування інтенсифікаторів.

7. Створити апарат для концентрування рідких харчових продуктів методом блокового виморожування безперервної дії з високою інтенсивністю процесів кристалізації.

Об'єкт досліджень - процеси тепломасообміну при концентруванні харчових рідин методом блокового виморожування в умовах механічного впливу на межу розділу фаз.

Предмет досліджень - апарат із механічними та акустичними інтенсифікаторами для низькотемпературного концентрування харчових рідин, математичні моделі комбінованих процесів тепломасообміну при концентруванні харчових рідин методом блокового виморожування.

Методи досліджень - аналітичні методи з використанням ЕОМ, методи теорії подібності, теплофізичного експерименту, масообмінного експерименту, випробування у виробничих умовах.

Для вирішення цих завдань створено експериментальні установки, які дозволили вивчити процеси виморожування на стрижневих, плоских і змієвикових кристалізаторах під впливом зовнішніх інтенсифікаторів.

На підставі отриманих експериментальних даних створено наукові основи, розроблено методику і програму для розрахунку процесу кріоконцентрування під впливом зовнішніх інтенсифікаторів. Створено промислову установку безперервної дії для концентрування цукрових розчинів.

У роботі захищаються такі наукові положення:

1. Протиріччя між технічною простотою установки блокового виморожування і її продуктивністю може вирішуватися шляхом локального механічного впливу на границю розділу фаз системи «лід - розчин». Мінімальні енергетичні витрати такого впливу при необхідному рівні ефективності можна забезпечити акустичними коливаннями при узгодженні їхніх параметрів і режиму виморожування.

2. Реалізація виморожувальних установок великої продуктивності безперервної дії вимагає об'єднання в одному агрегаті апаратів послідовного вирішування етапів «кристалізації-сепарування-відтанення-рециклінгу льоду».

Наукова новизна одержаних результатів. Новими науковими результатами роботи є:

- Модель кріоконцентрування методом блокового виморожування, яка встановлює динаміку зростання блоку льоду, визначає поля температур у блоці льоду, динаміку зміни концентрації продукту залежно від конструктивних параметрів, режимів виморожування і характеристик інтенсифікаторів;

- Нові числа подібності, названі хвильовими, які узагальнили бази експериментальних даних із масообміну при кристалізації при впливі інтенсифікаторів;

- Кінетичні залежності зростання блоку льоду, структури блоку льоду, поточної концентрації продукту, від висоти блоку льоду, температури кристалізатора, початкової концентрації продукту параметрів роботи інтенсифікаторів і часу;

- Критеріальне рівняння, що описує комбіновані тепломасообмінні процеси на кристалізаторах, яке враховує режими роботи інтенсифікаторів;

- Методика розрахунку і оптимізації процесів концентрування при блоковому виморожуванні.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблена за участю автора методика розрахунку обладнання для кріоконцентрування яка використовувалася при проектуванні кристалізаторів для кріоконцентратора, створеного за замовленням Яготинського цукрового заводу. Розроблені методика та обладнання знайдуть застосування для проектування кріоконцентраторів для різних харчових продуктів. Створено п'ятизонну установку для концентрування методом блокового виморожування з об'ємом концентраторів 100 дм³. Розраховано типорозмірний ряд установок блокового виморожування. Визначено критеріальне рівняння залежності хвильового числа Стантона від числа Грасгофа і хвильових чисел Рейнольдса і числа Грасгофа для кристалізації цукрового розчину в кріоконцентраторі. Отримана програма розрахунку на ЕОМ процесів тепломасопереносу при кріоконцентруванні з інтенсифікаторами.

Особистий внесок здобувача. У процесі виконання дисертаційної роботи автором самостійно виконано огляд наукової літератури за темою досліджень. Разом із науковим керівником сформульовано наукові положення, які описують концентрування харчових рідин в кріоконцентраторах методом блокового виморожування і програма експериментальних досліджень, поставлені задачі математичного моделювання низькотемпературного концентрування харчових рідин в умовах дії інтенсифікаторів. Дисертантом самостійно виконано аналітичні та експериментальні дослідження за темою дисертації, науковий аналіз, математична обробка та узагальнення їхніх результатів, формулювання висновків і пропозицій. Дисертант брав участь у виготовленні кристалізаторів і п'ятизонного кріокоцентратора.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на конференціях науково-викладацького складу ОНАХТ 2004-2013 рр., на Міжнародній конференції "Науково-технічний прогрес у харчовій промисловості" (Белорусь, 1995 р.), на конференції "Інтегровані технології та енергозбереження" (м. Харків 2003, 2007 рр.); Міжнародної конференції "Екологія людини і проблеми виховання молодих вчених" (м. Одеса, 2007 р.), на міжнародній конференції "Хлібопродукти-2005" (м. Одеса, 2005 р.), на міжнародній конференції "Підви-

щення енергетичної ефективності харчових і хімічних виробництв" (м. Одеса 2008, 2010, 2012 р.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи, одержані результати та рекомендації з їхнього використання повністю відображені у 18 друкованих працях, з них 1 монографія, 1 стаття в іноземному науковому виданні, 4 публікацій у фахових виданнях України.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, що включає 165 найменувань (16 сторінок), 3 додатки (7 сторінок).

Роботу викладено на 161 сторінці, які включають 54 рисунки (18 сторінок), 20 таблиць (12 сторінок).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, наукові положення, показано наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів, вказані публікації за темою дисертації.

В **першому розділі** "Аналіз тенденцій розвитку теорії та техніки концентрування рідких харчових продуктів" розглянуто, як основи теорії та методу блокового виморожування, що були започатковані проф. Бурдо О.Г., розвивались у дисертаціях Аль-згул-Бассама, С.І. Міленчука, О.О. Коваленко, Л.М. Тележенко, Л.А. Осипової, В.П. Мординського та інших. Обґрунтовано інноваційну привабливість методу та визначено перспективні завдання його удосконалення. Запропоновано принцип установки безперервної дії та засіб інтенсифікування процесу кристалізації за допомогою акустичних генераторів.

У **другому розділі** "Методи досліджень комбінованих процесів тепломасопереносу при блоковому виморожуванні" розглядаються методи аналітичного та експериментального дослідження процесів тепломасообміну при виморожуванні харчових рідин на циліндричних та плоских (горизонтальних) поверхнях в умовах дії механічних та акустичних генераторів коливань. Аналіз теплових режимів пов'язано з постановкою нестационарної задачі рухомої границі затвердіння (задача Стефана).

Розрахункова схема процесу кристалізації (рис.1) при дії генератора коливань на приграничний шар продукту включає ще блок льоду та поверхню кристалізатора. Принципово, розглядається генератор механічних (МП), або акустичних (АІ) коливань. В об'ємі продукту переміщується мембрана, швидкість якої w_{γ} (рис.1).

За прийнятим механізмом формування кристалу льоду можливість його зростання або плавлення визначається результируючим тепловим потоком на границі «блок льоду - приграничний шар» (рис.1). Стінка каналу, в якому протікає холодильний агент або холодоносії, непроникна для потоку маси (m_n). Разом з тим, потік m_n є визначальним при формуванні теплових балансів у системі. Тому сумарний тепловий потік через блок льоду і через стінку ($Q_{ст}$) значно перевищує тепловий потік від самого розчину (Q_p), який витрачається на охолодження розчину і на компенсацію теплопритоків із навколишнього середовища через корпус концентратора. Потік (Q_n) враховує витрати енергії на кристалізацію льоду масою m_n при теплоті фазового

переходу Ω і витрати енергії на переохолодження всього блоку (маса якого m_L , а зниження температури Δt_L). Крім того, слід передбачити кількість енергії від генератора коливань (інтенсифікатора Q_H).

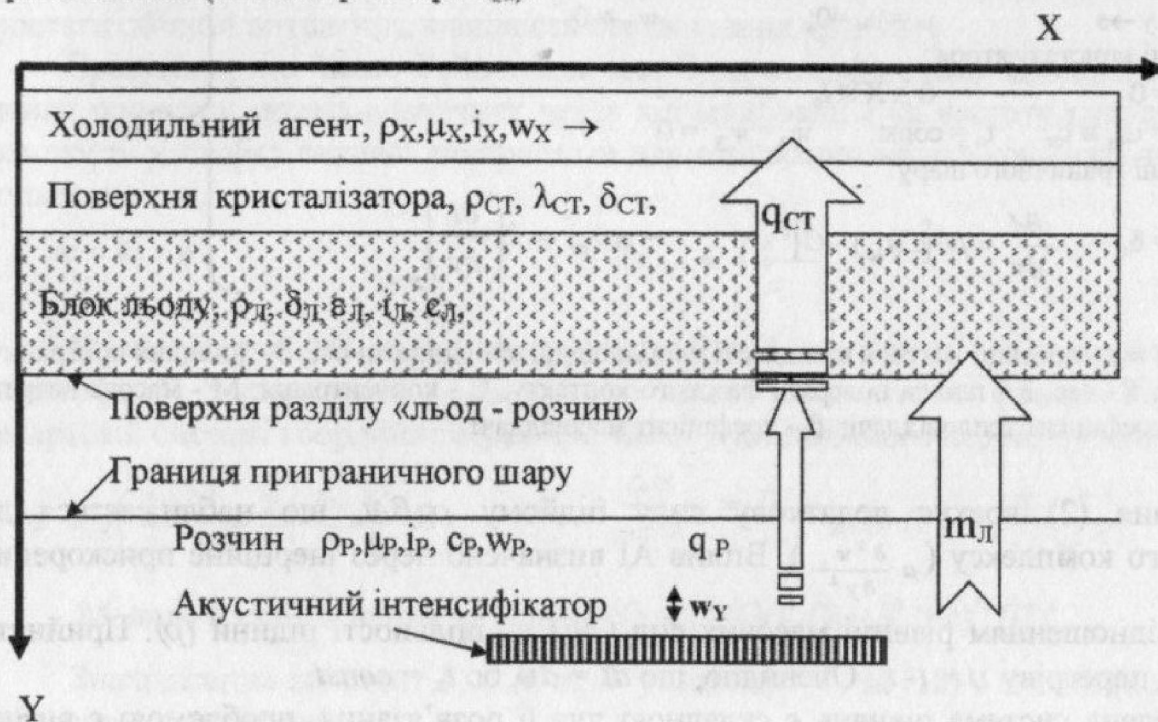


Рис. 1. Теплофізична модель процесу блокового виморожування при дії АІ.

Тоді статична енергетична модель має вигляд :

$$q_{CT} = q_L + q_P + q_H = m_L \Omega + m_L c_L \Delta t_L + M_P c_P \Delta t_P + q_{OC} + q_H \quad (1)$$

Реалізація моделі (1) пов'язана із розрахунком m_L . А це задачі кінетичної моделі, яка має визначити поля температур у блоці льоду та в стінці, ентальпії, поля температур та концентрацій рідкої і твердої фаз. В умовах природної конвекції поля концентрацій мають чітко виражений пік на границі розділу льоду із розчином. Саме на цю границю має впливати АІ.

Основою кінетичної моделі є процес формування блоку льоду. Для кристалізатора з прийнятим положенням координат (рис. 1) складемо систему рівнянь, що описує комбіновані процеси тепломасопереносу та гідродинаміки при таких припущеннях: рідина є нестислою, її параметри - сталі; процес є квазістаціонарним; теплопровідністю повздовж приграничного шару можна знехтувати; а товщини гідродинамічного, теплового та дифузійного приграничних шарів рівні.

При таких припущеннях поля температур та швидкостей можна описати в наближенні приграничного шару. Разом із рівнянням енергії, суцільності, Фур'є-Кірхгофа (які записуються традиційно) запишемо рівняння руху, що буде враховувати специфічну гідродинамічну ситуацію в апараті.

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + g\beta v + j \quad (2)$$

Запишемо граничні умови:

Далеко від поверхні теплообміну:

$$y \rightarrow s \quad v = v_0 = 0; \quad w_y = 0$$

На поверхні кристалізатора:

$$y = 0 \quad 0 \leq X \leq l_0 \\ v = v_{cr} \equiv t_{cr} \quad t_0 = \text{const}; \quad w_x = w_y = 0$$

На поверхні граничного шару:

$$y = \delta_\tau \quad \frac{dM}{d\tau} = \beta F [C(t_{kp}) - C] \quad -\alpha v_{cr} = \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y=\delta_\tau} \quad (3)$$

де: w_x і w_y - проєкції вектора швидкості на відповідні координатні осі; δ - товщина приграничного шару; τ - час, F - площа поверхні фазового контакту; C - концентрація; M - масова витрата льоду; α - коефіцієнт тепловіддачі; β - коефіцієнт масовіддачі

Рівняння (2) врахує додаткову силу підйому $\rho g \beta \Delta t$, що наближається до в'язкісного комплексу ($\mu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2}$). Вплив АІ визначено через інерційне прискорення j , яке є відношенням різниці масових сил (ΔF) до щільності рідини (ρ). Прийнято параметр перегріву $v = t - t_0$. Очевидно, що $dt = dv$, бо $t_0 = \text{const}$.

Наведена система рівнянь є складною для її розв'язання, проблемою є визначення компонент швидкості w_x та w_y . Але наведена модель дозволяє трансформувати її методами теорії подібності у форму узагальнених змінних.

Модель кінетики кристалізації із акустичним інтенсифікатором (АІ). Звичайно, швидкість потоку визначається відношенням об'ємного розходу (V) до площини живого перерізу каналу (F). У задачі, що аналізується, в явному вигляді ці параметри не визначаються, але, вважаємо, що V залежить від ходу мембрани s , частоти пульсацій f та діаметра мембрани АІ d і визначаються рядом корелювальних коефіцієнтів k .

Таким чином, швидкість продукту в апараті та відповідне модифіковане хвильове число Рейнольдса визначаються як:

$$w = \frac{V}{F} = \frac{k_3 d^3 f}{k_6 d^2} = k_7 d f; \quad \text{а} \quad \text{Re}_B = \frac{\rho d^2 f}{\mu} \quad (4)$$

Конвективні процеси в апараті характеризує число Грасгофа, а вплив енергії АІ на кінетику кристалізації визначимо із рівняння Фур'є-Кирхгофа:

$$c_p \rho \frac{dt}{d\tau} = \lambda \nabla^2 t + \mu \Phi \quad c_p \rho \frac{dt}{d\tau} \left(\frac{dy}{dw} \right)^2 \frac{1}{\mu} = 1 \quad (5)$$

На основі відомих із теорії подібності правил отримаємо хвильові числа Ейлера та Стантона:

$$\text{Eu}_B = \frac{q_V}{\mu f^2} \quad \text{St}_B = \frac{\beta}{df} \quad (6)$$

Загальний вигляд критеріального рівняння буде:

$$\text{St}_B = A(\text{Gr})^b (\text{Re}_B)^n (\text{Sc})^m \quad (7)$$

Модель кінетики кристалізації із МІ. Технічно, схема з МІ реалізується пульсаціями механічної мембрани, частота якої регулюється, наприклад, частотним перетворювачем. Із зростанням потужності, що споживається приводом МІ, будуть зростати об'ємні витрати та швидкість переміщення продукту.

Зрозуміло, що число Рейнольдса має бути модифіковане. Швидкість переміщення продукту можна визначити через хід мембрани s та частоту пульсацій n . А швидкість у такому вигляді використати для отримання модифікованого числа Рейнольдса:

$$w = k_1 s n \quad \text{Re}_M = \frac{\rho s^2 n}{\mu} \quad (8)$$

Вплив енергії МІ на кінетику кристалізації визначимо із рівняння Фур'є-Кирхгофа (5). З урахуванням одномірного запису дисипативної функції Релея (Φ) в декартовій системі координат отримано число пульсаційного перемішування:

$$\Phi = 2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad c_p \rho \frac{\Delta t s^2}{\tau \mu w^2} = \Pi, \quad \text{або} \quad \Pi = \frac{q_v s^2}{\mu w^2} \quad (9)$$

$$\text{Модель в узагальнених змінних:} \quad \text{Sh} = A (\text{Gr})^b (\text{Re}_M)^n (\text{Sc})^m (\Pi)^k \quad (10)$$

Знаходження констант A, b, n, m, k у моделях (7) та (10) є задача експериментального моделювання.

У третьому розділі "Експериментальні дослідження кінетики комбінованих процесів блокового виморожування води із розчинів" наведено результати експериментальних досліджень процесів тепломасопереносу при виморожуванні харчових рідин за методиками, що розглянуті у розділі 2. Досліди проводилися на 2 стендах: із циліндричним кристалізатором (рис. 2,а), та плоским горизонтальним (рис. 2,б).

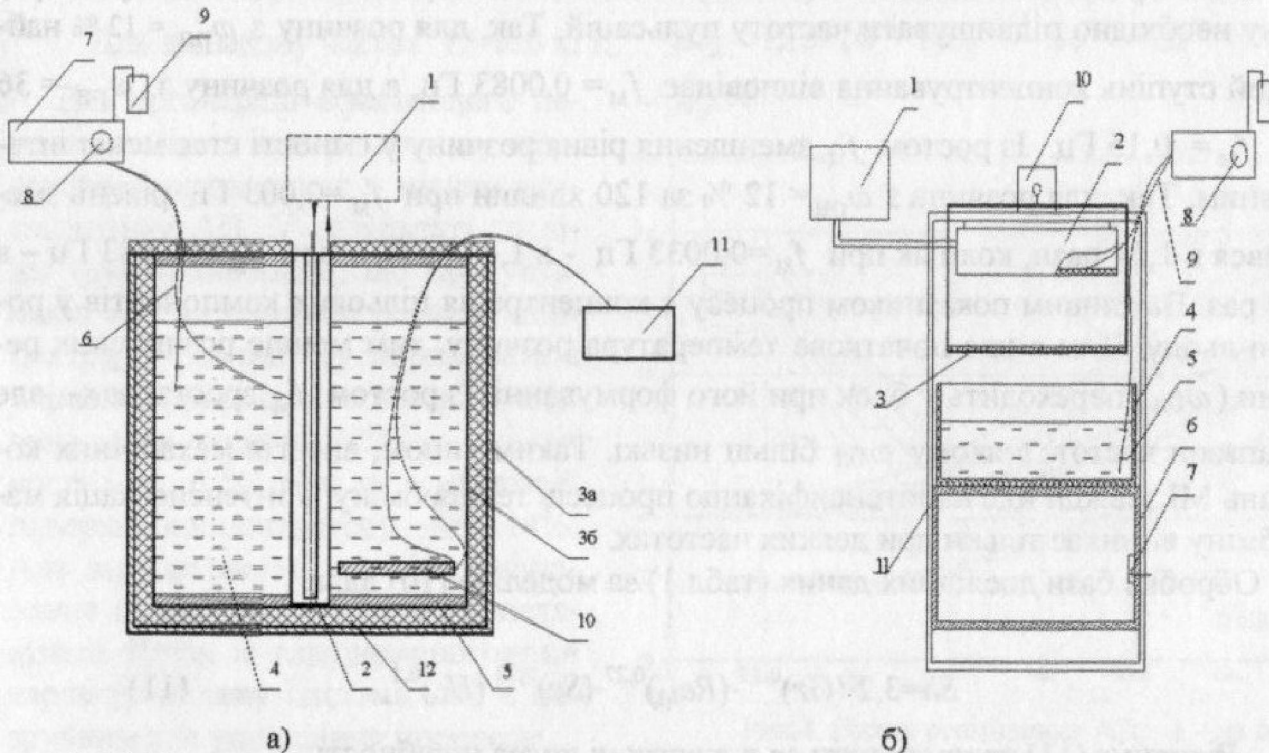


Рис. 2. Експериментальні стенди: 1 - холодильна система, 2 - кристалізатор, 3 - концентратор, 4 - рідина, що концентрується, 5... 12 - допоміжні елементи.

Холодильна система стенду змонтована на базі водоохолоджувача ВДО-0,35. Кристалізатор (рис.2,а) – це трубка Фільда ($d_{кр} = 18 \times 10^{-3} \text{ м}$, $h_{кр} = 21 \times 10^{-2} \text{ м}$). Мідь-константанові термомпари виготовлені в чохлах $d_t = 7 \times 10^{-4} \text{ м}$. Комутуються до мікрровольтметра Щ 304 – 2 (7, рис.2,а) перемикачем 8. Система АІ включає п'єзокерамічний випромінювач (10) та генератор (11).

Горизонтальний кристалізатор (рис.2,б) є випарником холодильної машини (1) має ширину 0,125м та довжину – 0,3м. Механічні коливання здійснювались пристроєм (10).

Експериментальні дослідження системи МІ проводилося в діапазоні параметрів, що наведені в табл.1.

Таблиця 1

Діапазон експериментальних досліджень системи МІ

№	$\omega_{рн}$, %	f_M , Гц	$t_{рн}$, °С	№	$\omega_{рн}$, %	f_M , Гц	$t_{рн}$, °С
1	12	0,003	6,0	9	26	0,275	5,0
2	12	0,003	21,0	10	26	0,2167	3,06
3	12	0,0033	19,3	11	26	0,003	2,5
4	12	0,0033	6,2	12	36	0,003	1,2
5	12	0,0083	4,3	13	36	0,1	2,8
6	26	0,1167	1,5	14	36	0,15	9
7	26	0,0833	3,5	15	36	0,2333	2,7
8	26	0,1833	4,3	16	36	0,0083	3,5

Аналіз результатів дослідів (табл.1) показав, що із зростанням концентрації розчину необхідно підвищувати частоту пульсацій. Так, для розчину з $\omega_{рн} = 12\%$ найвищий ступінь концентрування відповідає $f_M = 0,0083$ Гц, а для розчину з $\omega_{рн} = 36\%$ - $f_M = 0,15$ Гц. Із ростом f_M зменшення рівня розчину у ємності стає менш інтенсивним. Так, для розчину з $\omega_{рн} = 12\%$ за 120 хвилин при $f_M = 0,003$ Гц рівень зменшився в 1,54 рази, коли як при $f_M = 0,0033$ Гц - в 1,44 рази, а при $f_M = 0,0083$ Гц - в 1,39 раз. Важливим показником процесу є концентрація цільових компонентів у розчині льоду. Чим вища початкова температура розчину, тим менше розчинених речовин ($\bar{\omega}_{бл}$) переходить у блок при його формуванні. Із ростом f_M зростає $\bar{\omega}_{бл}$, але є діапазон частот, в якому $\bar{\omega}_{бл}$ більш низькі. Таким чином, енергія механічних коливань МІ завжди йде на інтенсифікацію процесів теплообміну, а інтенсифікація масообміну виникає тільки при деяких частотах.

Обробка бази дослідних даних (табл.1) за моделлю (10) дала:

$$Sh = 3,2 \cdot (Gr)^{0,15} \cdot (Re_M)^{0,27} \cdot (Sc)^{0,33} \cdot (\Pi_M)^{0,1}, \quad (11)$$

Рівняння (11) рекомендується в діапазоні чисел подібності:

$$10^6 < Gr < 10^8; 0,05 < Re_M < 5; 2 \cdot 10^4 < Sc < 20 \cdot 10^4; 10^2 < \Pi < 10^4.$$

Експериментальні дослідження системи АІІ. Досліджувались 2 системи акустичних інтенсифікаторів: АІ1 та АІ2 (рис.3).

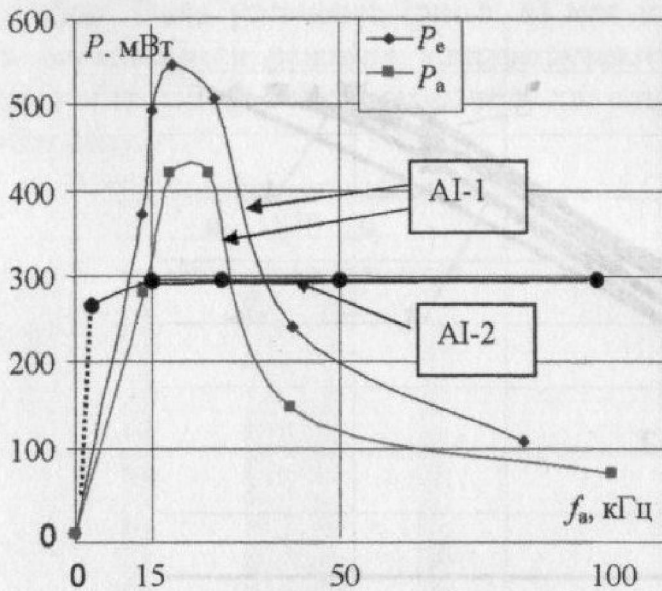


Рис.3. Тарировка акустичних інтенсифікаторів.

Тарировка генераторів передбачала вимірювання електричної потужності (P_e) та теплової (P_a), що визначалася за методом калориметра. Для системи АІ2 значення P_e та P_a практично співпадали. Величина P_e вимірювалася мультиметром Ф-43104 з похибкою до 4%.

Задачами дослідів було визначити вплив частоти коливань, та місця розташування АІ на кінетику процесу кристалізації.

Дослідження проводилися на виноградному соку та на екстрактах із виноградних вичавок. При збільшенні частот від 15 до 50 кГц інтенсивність кристалізації зростає, і перевищує на (20...30) % результати дослідів без АІІ. У діапазоні від 50 до 100 кГц інтенсивність процесу падала, а сам блок льоду мав рихлу структуру. Точкою перегину залежності була частота 15 кГц. Тому узагальнення бази експериментальних даних за моделлю (7) проведено окремо:

$$\text{Для діапазону частот } 0-15 \text{ кГц: } St_B = 5,5 \cdot 10^{-11} \cdot Re_B^{-0,924} \cdot Sc^{0,33} \cdot Gr^2 \quad (12)$$

$$\text{Для діапазону частот } 15-100 \text{ кГц: } St_B = 1,15 \cdot 10^{-8} \cdot Re_B^{-1,06} \cdot Sc^{0,33} \cdot Gr^{1,6} \quad (13)$$

Для організації ефективного перемішування у приграничному шарі важливо визначитися з місцем розташування АІІ. У результаті дослідів (рис.4) показано, що при установці АІІ на поверхні розчину концентрація розчину (у порівнянні з умовами природної конвекції) підвищується лише на 3 %, на дні ємності – на 6 %, тоді як на боковій поверхні концентратора – на 14%. Але завжди акустичне випромінювання інтенсифікує процес кристалізації. Разом із тим, немонотонний характер впливу системи АІІ є незручним для управління процесом.

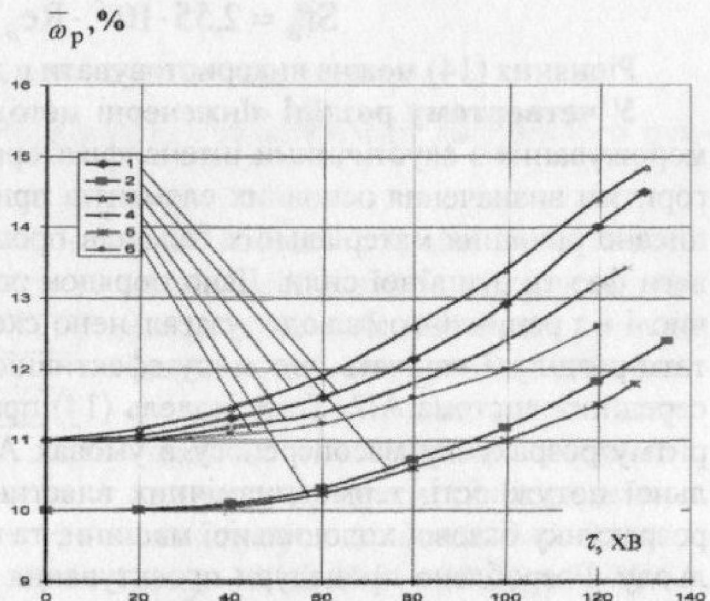


Рис.4. Вплив розміщення АІІ: 1 - на дні концентратора; 2 - на поверхні розчину; 3 на стінці концентратора; 4,5,6 - без АІ.

Експериментальні дослідження системи AI2. Проводились на стенді із горизонтальним кристалізатором (рис. 2, б). Результати наведено на рис. 5.

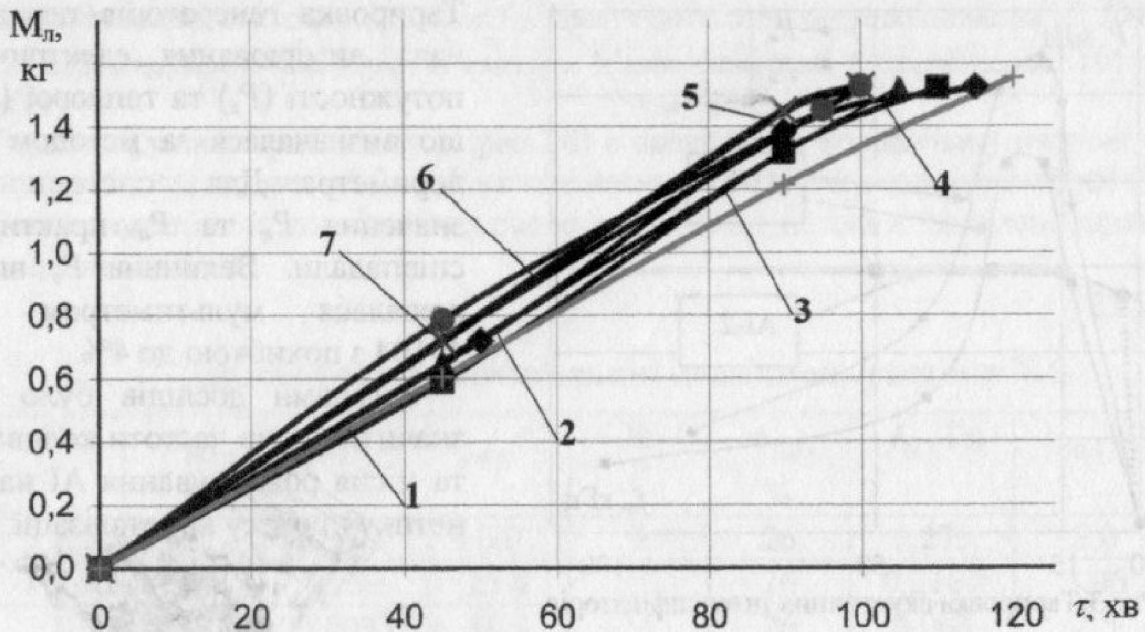


Рис. 5. Кінетика росту блоку льоду на горизонтальному кристалізаторі:

1 – 0 кГц; 2 – 7 кГц; 3 – 10 кГц; 4 – 20 кГц; 5 – 40 кГц; 6 – 60 кГц; 7 – 100 кГц.

Ефект використання AI2 був позитивним. Тривалість виморожування зменшувалася на 5...15 %. Із зростанням початкової концентрації розчину інтенсивність виморожування зменшувалася незначно. У всьому діапазоні від 7 до 100 кГц спостерігалася стабільне зростання інтенсивності кристалізації при підвищенні частоти коливань. Узагальнення бази експериментальних даних проведено за моделлю (7)

$$St_B = 2,55 \cdot 10^{-5} \cdot Re_B^{-0,0947} \cdot Sc^{0,33} \cdot Gr^{0,3} \quad (14)$$

Рівняння (14) можна використовувати в діапазоні $100 \leq f \leq 7$ кГц.

У четвертому розділі «Інженерні методи розрахунку установок блокового виморожування з акустичними інтенсифікаторами» наведено порядки, процедури, алгоритми визначення основних елементів при проектуванні кріоконцентраторів. Записано рівняння матеріальних балансів процесу, принципи визначення умов рівноваги фаз та рушійної сили. Дано порядок розрахунку холодильної машини, в тому числі і з рециклінгом льоду, узагальнено схему розрахунку кристалізатора. Результати розділу 3 свідчать, що вищу ефективність мають акустичні інтенсифікатори, а серед них система AI2. Тому модель (14) прийнято за основу при формуванні алгоритму розрахунку масопереносу в умовах AI. Наведено схему розрахунку холодильної потужності, термодинамічних властивостей холодильних агентів, структури розрахунку базової холодильної машини, та машини із конденсатором з плавленням льоду. Розроблено процедури проектування установок блокового виморожування з рециклінгом льоду та AI. Наведено порядок оцінки економічної ефективності проекту.

У п'ятому розділі «Випробування установок блокового виморожування в умовах цукрового виробництва» наведено результати стендових досліджень 2 зразків розробок. Одна установка (рис.6, а) має циліндричний кристалізатор, призначена для опрацювання режимів концентрування дифузійного соку. Друга (рис.6,б) – п'ятизонна конструкція, призначена для опрацювання процесів безперервної переробки соку.

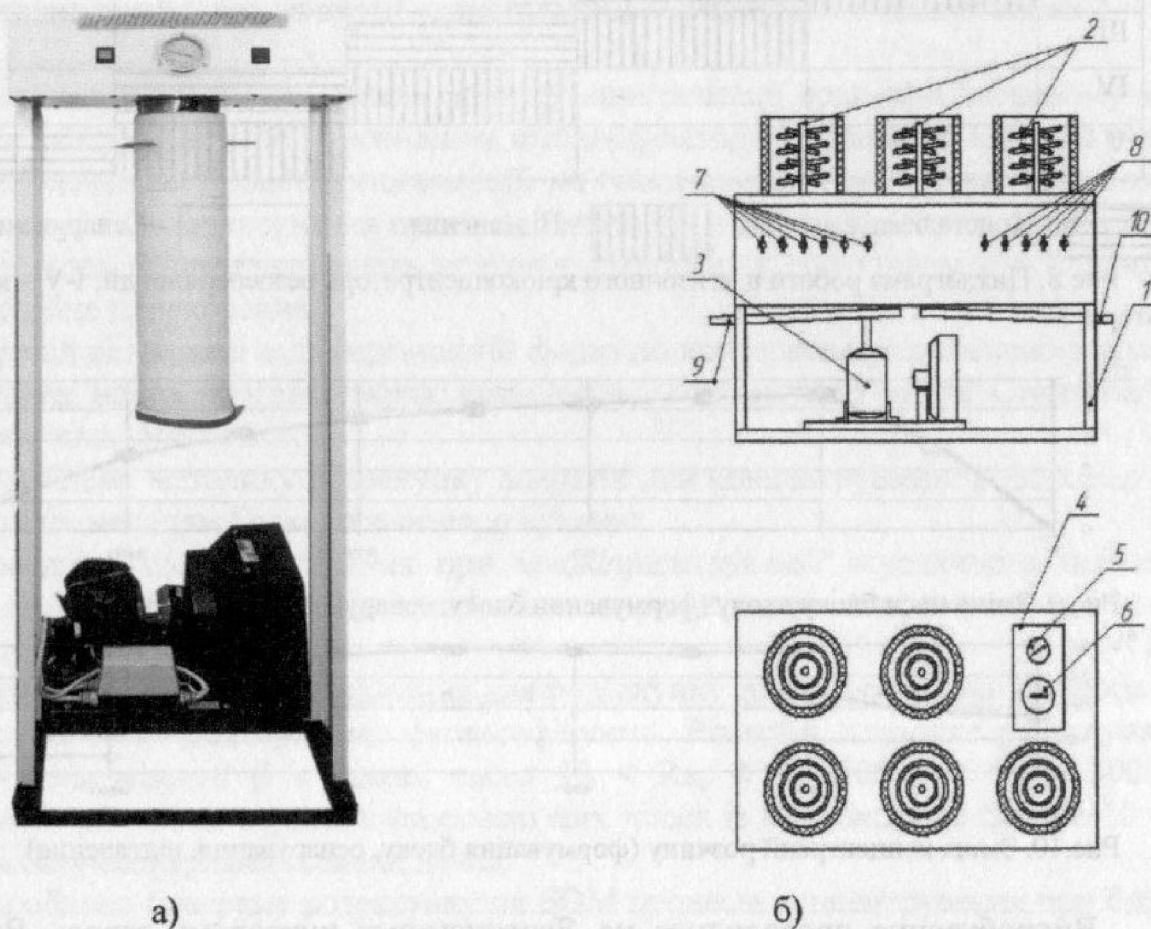


Рис.6. Конструкції дослідних установок для блокового виморожування.

На установці (рис.6,а) досліджувалися режими кристалізації дифузійного цукрового соку (рис.7).

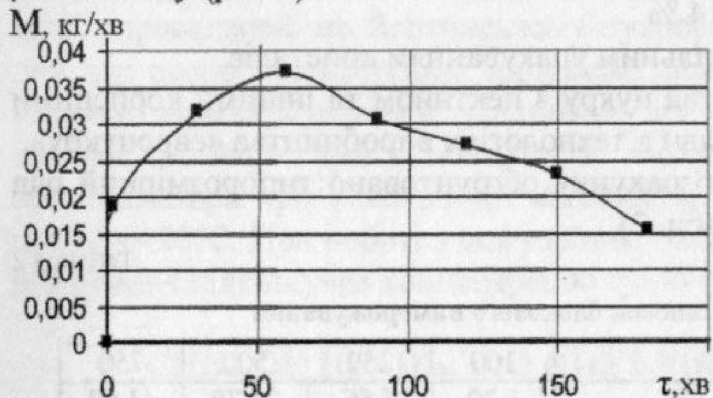


Рис.7. Динаміка виморожування цукрового розчину ($C=30\%$, $t_0=-20^\circ\text{C}$)

Виникала задача визначення доцільного рівня температур процесу для забезпечення рівних швидкостей виморожування при різних концентраціях соку. Установлено, що для концентрації цукрового розчину 10 % доцільна температура в випарнику становить -12°C , 20 % -15°C , а 30 % -20°C .

Для п'ятизонного апарата (рис. 6,б) послідовно в кожній зоні здійснюються процеси кристалізації (формування блоку льоду), сепарування та відтанення (рис. 8-10). Установка працює за схемою з рециклінгом енергії льоду при його відтаненні.



Рис. 8. Циклограма роботи п'ятизонного кріоконцентратора безперервної дії, I-V – концентратори

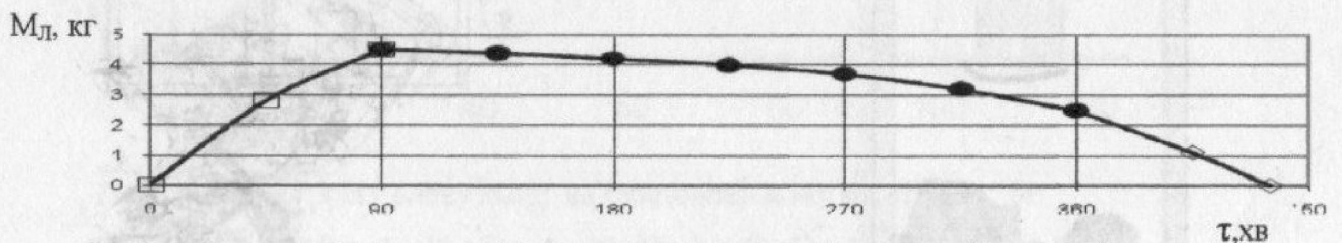


Рис. 9. Зміна маси блоку льоду (формування блоку, сепарування, відтанення).

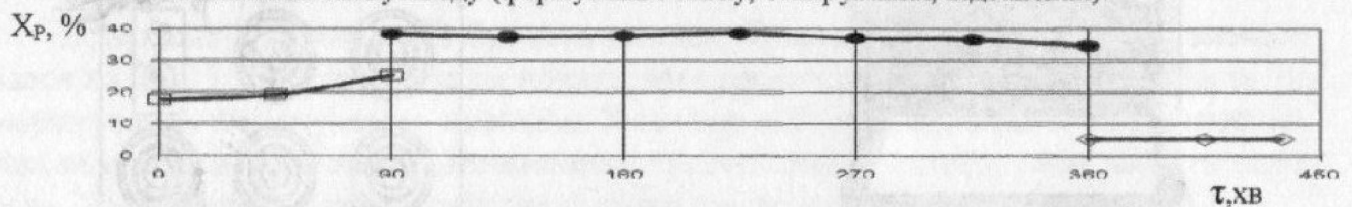


Рис. 10. Зміна концентрації розчину (формування блоку, сепарування, відтанення).

Випробування проводилися на Яготинському цукровому заводі. Визначено енергетичну ефективність роботи акустичних інтенсифікаторів (АІ) (рис. 8-10).

Результати випробувань показали, що розроблена установка з рециклінгом льоду та АІ має позитивний ефект:

- енерговитрати зменшуються на 14 %;
- блок льоду формується з більш щільним упакуванням кристалів;
- вирішується завдання виробництва цукру з пектином та іншими корисними компонентами. Установка має перспективи в технологіях виробництва «євроцукру».

На основі розробленої програми розрахунку обґрунтовано типорозмірний ряд установок блокового виморожування (табл. 2)

Таблиця 2

Типорозмірний ряд установок блокового виморожування

$V \cdot 10^3, \text{м}^3$	Об'єм концентратора	100	250	500	750
N, кВт	Холодильна потужність	1,39	5,56	27,78	41,67
d, h, м	Діаметр та висота ємкості	0,21	0,33	0,57	0,65
L, м	Довжина апарата	0,73	1,16	1,99	2,28
B, м	Ширина апарата	0,52	0,83	1,42	1,63

ВИСНОВКИ

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень виявлено наявне протиріччя в сучасній техніці блокового виморожування між простотою конструкції та обмеженням її класом апаратів періодичної дії, яке можна вирішувати шляхом застосування акустичних інтенсифікаторів та об'єднання в одному агрегаті апаратів, що послідовно реалізують процеси «кристалізації – сепарування - відтанення».

1. Статична енергетична модель процесу кристалізації води при блоковому виморожуванні в умовах роботи зовнішніх інтенсифікаторів передбачає витрати енергії безпосередньо на процес кристалізації, на охолодження розчину на переохолодження льоду, на компенсування притоків теплоти із навколишнього середовища та інтенсифікатора. Кінетична модель враховує специфічну гідродинамічну ситуацію через інерційне прискорення.

2. Перехід від моделі в диференційній формі до критеріальної здійснено завдяки використанню нових узагальнюючих комплексів – хвильового числа Стантона та хвильового числа Рейнольдса.

3. Розроблено методику розрахунку апаратів для концентрування рідких харчових продуктів методом блокового виморожування.

4. Доведено, що застосування при кріоконцентруванні акустичного інтенсифікатора на 15-20 % збільшує продуктивність і знижує питомі витрати на виробництво.

5. Отримано критеріальне рівняння для розрахунку тепломасообмінних процесів при використанні факторів, що інтенсифікують. Рівняння дозволяє розрахувати коефіцієнт масовіддачі β в межах чисел $18 < Re_{\nu} < 50$, $10000 < Sc < 50000$. Критеріальні рівняння, отримані на основі цих чисел із похибкою не більше 10 %, описують базу експериментальних даних.

6. Розроблено програму розрахунку на ЕОМ процесів концентрування при блочному виморожуванні з використанням інтенсифікаторів. Розроблено і виготовлено дослідний зразок концентратора з акустичним інтенсифікатором, який пройшов апробацію в умовах цукрового виробництва.

7. Розроблено і виготовлено безперервно діючий п'ятизонний кріоконцентратор, який впроваджено на Яготинському цукровому заводі. Акт впровадження підтвердив, що розроблений зразок відповідає вимогам технічного завдання. Основні показники виморожувальної установки відповідають нормативам кращих зразків техніки (питома продуктивність з льоду складає 9 кг з 1 метра поверхні кристалізатора при температурі кипіння холодильного агента $t_0 = -15^{\circ}\text{C}$ і 14 кг/м² при $t_0 = -25^{\circ}\text{C}$. При роботі з дифузійним соком цукрових буряків один ступінь виморожування підвищував концентрацію сухих речовин від 16 % до 28 %.

СПИСОК ПРАЦЬ, ЩО ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Харенко Д.А. Техніка блочного вимороживання [Текст] / Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынський В.П., Харенко Д.А. // Монографія - Одеса, 2011 - 1 - 294 С.

Особистий внесок здобувача: брав участь у підготовці розділів 1-4,7,9,11,12.

2. Kharenko D.A Intensificachion of processes of low-temperature separation of food solutions [Текст] / Burdo O.G., Kovalenko E.A., Kharenko D.A. // Applaid Thermal Engineering, № 28 2008 – London, 2008 - Pp. 311- 316.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

3. Харенко Д.О. Енергетичні аспекти низькотемпературної технології отримання смакоароматичних добавок [Текст] / Коваленко О.О., Мілінчук С.І., Харенко Д.О. // Науково-практичний журнал «Інтегровані технології енергозбереження» - Харків, 2003. - С. 13-17.

Особистий внесок здобувача: отримання смакоароматичних зразків.

4. Харенко Д.О. Формування показників якості ароматичних добавок [Текст] / Бурдо О.Г., Коваленко Е.А., Харенко Д.О. // Наук. Вісник ДонДУЕТ, №1(17) 2003-Донецьк, 2003. – С. 36-41.

Особистий внесок здобувача: участь у розробці показників якості, підготовка матеріалів до публікації.

5. Харенко Д.О. Дослідження комбінованих процесів блокового виморожування води з харчових розчинів [Текст] / Бурдо О.Г., Коваленко Е.А., Харенко Д.О. // збірник наукових праць ДонДУЕТ – Донецьк, 2005. - С. 126-132.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

6. Харенко Д.О. Моделювання комбінованих процесів низькотемпературного розділення харчових розчинів [Текст] / Бурдо О.Г., Терзієв С.Г. Харенко Д.О. // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій - Одеса, 2005. – С. 36-41.

Особистий внесок здобувача: розробка моделі процесу, підготовка матеріалів до публікації.

7. Харенко Д.О. Процеси та апарати для отримання перспективних смакоароматичних добавок [Текст] / Бурдо О.Г., Коваленко О.О., Харенко Д.О. // Опубліковано за матеріалами Міжнародної конференції “Розроблення та виробництво продуктів функціонального харчування” - Київ, НУХТ, 2004. – С. 31-44.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

8. Харенко Д.О. Дослідження комбінованих процесів блочного виморожування води з харчових розчинів [Текст] / Бурдо О.Г., Коваленко О.О., Харенко Д.О.// Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. вип.13, т. 1 / Голов. ред. О.О. Шубіна – Донецьк, 2005. – С. 22-24.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

9. Харенко Д.О. Интенсификация процессов блочного вымораживания воды из растворов [Текст] / Бурдо О.Г., Коваленко О.О., Харенко Д.А.// Матеріали 71-шої наукової конференції молодих вчених, аспірантів та студентів. “Наукові здобутки молоді” - Київ, НУХТ 2005. – С. 36-41.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

10. Харенко Д.О. Моделювання комбінованих процесів низькотемпературного розділення харчових розчинів [Текст] / Бурдо О.Г., Коваленко О.О., Харенко Д.О. // Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції "Харчові технології - 2005" 12-14 вересня 2005 р. – Одеса, 2005. – С. 27-28.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

11. Харенко Д.О. Комбіновані процеси низькотемпературного розділення харчових розчинів [Текст] / Бурдо О.Г., Коваленко О.О., Харенко Д.О. // Межд. научно-практич. конференция «Актуальне проблемы питания: технология и оборудование, организация и экономика» - Донецк, 2005. – С. 33-36.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджен.

12. Харенко Д.О. Энергоефективна технологія концентрування рідких систем харчових виробництв [Текст] / Бурдо О.Г., Коваленко О.О., Харенко Д.О., Василів О.Б. // Темат.зб.наук.пр. – Випуск 15. – Донецьк, 2006. - С. 25-31.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

13. Харенко Д.О. Кинетика блочного вымораживания воды из раствора, в объеме которого пульсирует мембрана [Текст] / Бурдо О.Г., Коваленко О.О., Харенко Д.А. // Наукові праці. – Випуск 28 Т.2., Одеська національна академія харчових технологій - Одеса, 2006.- С. 103-111.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

14. Kharenko D.A. Intensification of process of freezing-out water from the food solution [Текст] / Burdo O.G., Kovalenko E. A., Kharenko D.A. // IV Minsk Inter. Seminar «Heat Pipes, Nest Pumps, Refrigerators» Minsk, 2005 - P. 412-419.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оптимізація за рівнем енергетичних витрат, підготовка матеріалів до публікації.

15. Харенко Д.А. Минимизация энергетических затрат в аппаратах блочного вымораживания [Текст] / Бурдо О.Г., Мордынский В.П., Харенко Д.А. // Наукові праці ОНАХТ, випуск 39, том 2 - Одеса, 2011 - С. 226-232.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

16. Харенко Д.А. Энергетические затраты в аппаратах блочного вымораживания [Текст] / Бурдо О.Г., Мордынский В.П., Харенко Д.А. // Матеріали МНПК «Інноваційні енерготехнології» - Одеса, 2011 - С. 224-230.

Особистий внесок здобувача: проведення енергетичного моніторингу, підготовка матеріалів до публікації.

17. Харенко Д.А. Эффективность частотных преобразователей в холодильной технике [Текст] / Харенко Д.А. // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія бізнес комфорт» - Одеса, 2012 - С. 52.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їхнього узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

АНОТАЦІЯ

Харенко Д.О. "Інтенсифікація тепломасообміну при блоковому виморожуванні води із розчинів". – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. Одеська національна академія харчових технологій, Міністерство освіти і науки України, Одеса 2013.

Дисертація присвячена розвитку теоретичних основ і техніки концентрування харчових рідин методом блокового виморожування. Показано протиріччя між технічною простотою розроблених установок такого типу та спробами на їхній основі перейти до апаратів великої потужності і безперервного принципу дії. Висунуто гіпотезу, що вихід із ситуації, що склалася, лежить у двох площинах: організацією локального механічного впливу на межу розділу фаз системи «лід - розчин» і шляхом об'єднання в одному агрегаті апаратів послідовно виконують основні етапи - «кристалізація - сепарування - відтанення - рециклінг льоду». Способом є локальний вплив на граничний шар, обрано акустичний генератор.

Методами експериментального моделювання встановлено приватні залежності впливу концентрації продукту, температури процесу, геометричних параметрів і форми кристалізатора, частоти і потужності акустичного інтенсифікатора та місця його розміщення на кінетику формування блоку льоду. Отримана база експериментальних даних узагальнена за допомогою хвильових чисел Стантона і Рейнольдса, числами Грасгофа і Шмідта. Було спроектовано 2 установки блокового виморожування. Перша - з циліндровим кристалізатором - призначена для відпрацювання в умовах виробництва технологічних параметрів кріоконцентрування дифузійного соку. Друга - була експериментальним зразком безперервно діючої установки з об'ємом концентраторів 100 дм³. Установка пройшла виробничі випробування і впроваджена на Яготинському цукровому заводі. Установка дозволяє виробляти новий для України продукт, який відповідає кращим зразкам «євроцукру».

Ключові слова: концентрування, виморожування, харчова рідина, кристалізатор, акустичний інтенсифікатор.

АННОТАЦИЯ

Харенко Д.А. "Интенсификация тепломассобмена при блочном вымораживании воды из растворов". – Рукопись.

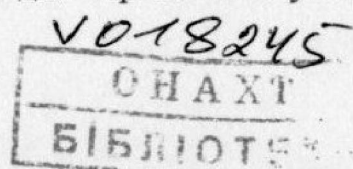
Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2013.

Диссертация посвящена развитию теоретических основ и техники концентрирования пищевых жидкостей методом блочного вымораживания. Анализ достигнутых результатов в технике блочного вымораживания установил противоречие между технической простотой разработанных установок такого типа и попытками на их

основе перейти к аппаратам большой производительности и непрерывного принципа действия. Выдвинута гипотеза, что выход из сложившейся ситуации лежит в двух плоскостях: организацией локального механического воздействия на границу раздела фаз системы «лед - раствор» и путем объединения в одном агрегате аппаратов последовательно решающих основные этапы – «кристаллизация – сепарирование – оттайка – рециклинг льда». Способом локального воздействия на пограничный слой выбран акустический генератор. Показано, что эффективность таких воздействий определяется четким согласованием параметров генератора и режимом вымораживания. Поскольку рекомендации для проектирования таких установок отсутствуют, то в работе проведен комплекс аналитических и экспериментальных исследований. Показано, что методы аналитического моделирования не дают простых решений. Привлечение λ -теоремы, метода анализа размерностей установило модель в форме критериальной зависимости, отражающей кинетику льдообразования в условиях действия акустического генератора и механического воздействия на пограничный слой. Серия специальных экспериментов показала, что и по эффективности процесса кристаллизации, и по простоте реализации конструкции, и по способу управления льдообразованием предпочтение отдается акустическим системам.

Обоснованы новые числа подобия: волновое число Стантона и волновое число Рейнольдса, которые совместно с традиционным числом Грасгофа дают модель кинетики роста блока льда в зависимости от режимных и конструктивных параметров вымораживателя, а также от параметров акустического интенсификатора. Методами экспериментального моделирования установлены частные зависимости влияния концентрации продукта, температуры процесса, геометрических параметров и формы кристаллизатора (вертикальная цилиндрическая или горизонтальная плоская), частоты и мощности акустического интенсификатора и места его монтажа (на поверхности раствора, на дне либо на боковой стенке концентратора) на кинетику формирования блока льда. Определялись во времени изменения концентрации раствора и массы блока льда. Анализировалась структура блока льда. Определено, что установка излучателей на боковой стенке приводит к интенсификации процесса льдообразования на 15...20 %. опыты проводились на виноградном соке, экстракте виноградных выжимок и на диффузионном соке сахарного производства. При стабильной мощности генератора с ростом частоты колебаний от 7 до 100 Гц наблюдалось пропорциональное повышение скорости вымораживания.

Полученная база экспериментальных данных обобщена с помощью обобщенных переменных: волновых чисел Стантона и Рейнольдса, а так же числами Грасгофа и Шмидта. Эти соотношения использованы как ключевые в инженерной методике расчета кинетики процесса формирования блока льда в условиях комбинированного теплового и акустического воздействия на жидкую пищевую систему. Методика предусматривает оценку материальных балансов, принципы определения условий фазовых равновесий и движущей силы процессов, порядок проектирования холодильной системы, в том числе и с рециклингом льда. Алгоритм доведен до программы, которая использовалась для компьютерного моделирования, проектирования и оптимизации параметров установки блочного вымораживания. На основе этой программы проведено проектирование 2 установок блочного вымораживания. Одна – с цилиндрическим кристаллизатором – предназначена для отработки в условиях



производства технологических параметров криоконцентрирования диффузионного сока. Вторая - являлась экспериментальным образцом непрерывно действующей установки с объемом концентраторов 100 дм³. Обоснована циклограмма работы аппаратов установки. Процесс кристаллизации занимает 20 % общего времени рабочего цикла, процесс сепарирования – 60 %, а оттайки – 20 %. Установка прошла производственные испытания и внедрена на Яготинском сахарном заводе. При температуре поверхности кристаллизатора - 15 °С производительность по льду составила 9 кг на 1 м² поверхности кристаллизатора, а при - 20 °С – 14 кг. Реализация режимов с рециклированием льда и использование акустических интенсификаторов обеспечивало снижение затрат электроэнергии на 12..14 %. Установка позволяет производить новый для Украины продукт, который соответствует лучшим образцам «евросахара», сахара с пектином и другими полезными веществами.

Результаты производственных испытаний показали не только инновационную привлекательность разработки, но подтвердило корректность предложенных инженерных методов проектирования подобных установок. Поэтому разработан типоразмерный ряд установок блочного вымораживания объемом 100, 250, 500 и 750 дм³ продукта. Такие установки могут использоваться в консервных, винодельческих, молочных и прочих сферах АПК.

Ключевые слова: концентрирование, вымораживание, пищевая жидкость, кристаллизатор, акустический интенсификатор, волновые числа подобия.

ANNOTATION

Kharenko D.A. "The intensification of heat and mass transfer in block freezing of liquids". – Manuscript

The candidate's thesis in technical sciences, specialty 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions. – Odessa National Academy of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa 2013.

Dissertation is sanctified to dedicate epy research of equipment for the concentration of food liquids. It is shown that the method of sectional freezing with lamellar crystallizers is the most effective for apparatuses vehicles of the large productivity. The research resulted in formulas for distribution of the field of temperatures and concentrations needed for sectional freezing on lamellar crystallizers .

The influence of regime parameters on growth kinetics of an ice block and its structure was experimentally investigated The obtained experimental results were presented in a summarizing kind in the form of criterion equation of dependence of the number of convective Sh mass shift from the relation of thermal stream under the action of Archimedes force of Ra diffusive - viscosity number of Sc, thermophysical parameters - number of Pr. Methodology of calculation of apparatuses for low temperature concentration of food liquids by the method of sectional freezing on lamellar crystallizers.

Was developed on the basis of the obtained theoretical and experimental data a three-levelled apparatus for the low temperature concentration of food liquids of the freezing on lamellar crystallizers.

The process criterial equation coefficients were received. The account method of microwave batch operation extractor is developed based on criterial equation. Benchmark tests confirmed adequacy of developed model.

Was developed and constructed a comparative calculation economic efficiency of evaporation and low temperature concentration is represented the thesis. According to the results of calculations an economic effect.

Keywords: concentration, freezing, food liquid, crystallizer, acoustic waves.