

Одеська державна академія харчових технологій

Мілінчук Сергій Іванович

УДК 66.021.001.57:621.56/59.004.18

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ ТА ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИ
БЛОЧНОМУ ВИМОРОЖУВАННІ**

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

Автореферат

*дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук*

Одеса – 2001

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор Бурдо Олег Григорович, Одеська державна академія харчових технологій, завідувач кафедри процесів та апаратів

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор Чепурненко Віктор Павлович, Одеська державна академія холоду, професор кафедри холодильних установок

кандидат технічних наук, доцент Погожих Микола Іванович, Харківська державна академія технологій та організації харчування, доцент кафедри енергетики та фізики

Провідна установа - Український державний університет харчових технологій, кафедра процесів і апаратів харчових виробництв та технологій консервування, Міністерство освіти і науки України, м. Київ

Захист відбудеться 08.06.2001 р. о 10-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 при Одеській державній академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеської державної академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112.

Автореферат розісланий 04.05.2001 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

Моргун В.О.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Динаміка розвитку переробної промисловості у світі свідчить, що сьогодні пріоритетне становище займають технології, які забезпечують максимальне збереження у готовому продукті смакових і харчових властивостей первинної сировини. Особливо це відноситься до харчових компонентів, які містять термолабільні продукти, зберігти якість яких при термічній обробці неможливо із-за значних втрат їх смакових, харчових та кольорових

властивостей.

Високоякісні українські продукти не можуть конкурувати на світовому ринку із-за значної енергоємності, що в 2-4 рази перевищує рівень розвинутих країн. Ключовим процесом, що визначає як якість так і коштовність готового продукту є обезвожування рідин. У світі цих вимог серед сучасних засобів концентрування особливе місце займають низькотемпературні технології. Одним з перспективних є метод блочного виморожування, розроблений в ОДАХТ, основними особливостями якого є формування блоку льоду на стадії кристалізації, а не сепарування і утворення прихильних умов для здійснення гравітаційного сепарування блоку. Разом з цим, метод має значні резерви енергозбереження у вигляді неефективного використання енергії, накопиченої у блоці льоду. Окрім того, відсутність достатньо коректних методів розрахунку процесів блочного виморожування стримує ефективне використання цього методу у промисловості.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконана відповідно до держбюджетної тематики науково-дослідницьких робіт ("Виробництво, переробка та збереження сільськогосподарської продукції" №0100U4572).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи - підвищити ефективність установок для виморожування за рахунок повного використання енергії льоду та поглиблення наукових основ для розрахунку і проєктування таких систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

скласти термодинамічну та масообмінну моделі кінетики процесу в умовах сумісного тепломасопереносу;

створити модель режимів роботи виморожувальних установок з рециклінгом льоду;

виконати комплексні експериментальні дослідження для визначення:

функціональних закономірностей кінетики масопереносу в залежності від конструктивних та режимних параметрів роботи кристалізатора; вплива рециклінгу льоду на режимні параметри виморожувальної установки;

узагальнити отримані результати і одержати критеріальні рівняння для розрахунку інтенсивності масопереносу при блочній кристалізації;

- розробити методику і створити комп'ютерну програму для розрахунку процесів концентрування блочним виморожуванням з рециклінгом льоду;

обґрунтувати раціональні режими роботи установки для різноманітних сполучень режимних та конструктивних параметрів.

Наукова новизна одержаних результатів. В результаті комплексу аналітичних та експериментальних досліджень вперше:

доказано наукові положення: а) "Системний аналіз і врахування структури продукту, яка змінюється, дозволяють розв'язати сумісну гідротепломасообмінну задачу формування твердої фази при блочному виморожуванні, узгоджену з термодинамічною моделлю генератора холода"; б) "Рециклінг блоку льоду на другій ступені конденсатора в комплексі вирішує енергетичну ефективність генератора холоду і проблему гравітаційного сепарування";

- отримано модель концентрування при блочному виморожуванні, яка враховує особливості типу системи охолодження і умови сумісного тепломасопереносу в стислих умовах;

отримано модель виморожувальної установки з рециклінгом льоду;

дістали подальший розвиток критеріальні рівняння для розрахунку інтенсивності масопереносу при блочному виморожуванні молочної сироватки;

методами ексергетичного аналізу порівняно ефективність випаровування та блочного виморожування за різними умовами експлуатації;

- розроблена методика розрахунку процесу концентрування розчинів при блочному виморожуванні з рециклінгом льоду.

Практичне значення одержаних результатів.

доведено перспективність застосування запропонованих автором апаратів та схем у процесах кріоконцентрування рідких харчових продуктів;

оригінальна схема виморожувальної установки, яка містить додатковий

конденсатор-плавитель, відчиняє нові можливості удосконалення холодильних технологій. Технічна новизна пропозиції захищена патентом України;

на основі комплексу аналітичних та експериментальних досліджень розроблена методика розрахунку процесу концентрування розчинів при блочному виморожуванні з рециклінгом льоду;

розроблено комп'ютерну програму розрахунку кріоконцентраторів блочного типу з рециклінгом льоду, що заснована на нових наукових результатах автора в області кінетики взаємодії розчину харчового продукту, блока льоду та типа системи охолодження;

випробування пілотного зразка підтвердило, що розв'язання проблеми зниження енергоспоживання при блочному виморожуванні досягнуте; розроблену пілотну установку впроваджено в учбовий процес, а її дослідно-промисловий зразок багатофункціонального блочного виморожувача пройшов стадію проектування та його виробництво здійснюється на АТ "Оріон".

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні і доказі наукових положень дисертації, розробці моделей при кріоконцентруванні рідких харчових продуктів, пропозиціях за постановкою і методиками комплексних експериментальних досліджень, проведенні дослідів, аналізі й узагальненні результатів досліджень, виступах з доповідями на конференціях, публікації одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та отримали позитивну оцінку на 58-60 наукових конференціях ОДАХТ (м.Одеса, 1998-2000 р.р.), на Міжнародній конференції "Проблеми і перспективи розвитку виробництва і споживання хлібопродуктів", (м. Одеса, 1997р.), на XVІІ Міжнародній конференції "Process engineering in prevention of environment" (Opole, Poland, 1999), X міжнародній конференції "Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв" (ICSE-99) (м. Львів, 1999р.), Науково-практичній конференції "Пути повышения эффективности хранения и переработки сельскохозяйственной продукции" (м. Одеса, 1999 р.), Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості" (м. Київ, 2000 р.), ІV Мінському міжнародному форумі "Тепломассообмен ММФ-2000" (м. Мінськ, 2000 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць, у тому числі: 6 - в наукових працях, 1 - рішення на видачу патенту на винахід, 4 - в тезах наукових конференцій.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації – 152 сторінки, включає 49 рисунків (29 стор.), 5 таблиць (3 стор.), 2 додатки (8 стор.). Список використаних бібліографічних джерел включає 147 найменувань (14 стор.).

Основний зміст роботи.

У вступі обгрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, наукові положення, показано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

В першому розділі надано огляд сучасних технологій концентрування: випаровування, мембранних технологій, виморожування, їх недоліки та переваги. Показано, що низькотемпературні методи мають значні переваги порівняно з іншими з точки зору якості отриманих концентратів. Проведено аналіз тенденцій подальшого вдосконалення методів кріоконцентрування. Показано, що найбільш привабливим є метод блочного виморожування, основні характеристики якого свідчать, що він не тільки дозволяє отримати продукт високої якості, але й значно знизити рівень енергоспоживання порівняно з іншими сучасними технологіями. Розглянуто та проаналізовано існуючі методи розрахунку та моделювання основних сучасних технологій виморожування.

Наведено необхідність розробки нового методу моделювання та розрахунку концентрування способом блочного виморожування на підставі сумісного розгляду та доповнення розглянутих

методів. Сформульовано задачі досліджень для створення удосконалених методів розрахунку процесів концентрування при блочному виморожуванні.

У другому розділі розроблено методика та розглянуто методи досліджень. Аналітичними методами отримано термодинамічну модель етапів виморожування та модель холодильної установки з рециклінгом льоду. Аналіз запропонованого рішення проведено за допомогою параметричної схеми (рис. 1). Показано, що ключовим при розрахунку схеми є процес формування блоку льоду, який визначається як кінетикою тепломасопереносу із розчину, так і термодинамічними (холодильний коефіцієнт η , тиск P_0) та теплотехнічними характеристиками холодильної машини. Не можливо встановити вплив Q_0 , N_3 , конструктивних особливостей кристалізатору (діаметру d , висоти H), вихідних параметрів розчину (X_n , t_n), та льоду (об'єму $V_{л}$, пористості ε) на кінцеві характеристики концентрату (X_k , C_k/C_n). Все це потребує системного підходу. Рис.1. Структурно-параметрична схема процесу блочного виморожування з рециклінгом льоду.

Термодинамічна модель процесу має три визначні етапи: 1) на початку процесу - система містить 3 елемента: холодильний агент, розчин, які мають вигляд суцільної системи, та стінка кристалізатора, що їх розділює; 2) в проміжному стані системи - розчин, який розподілюється на тверду фазу, що відокремлена від нього дифузійним приграничним шаром; 3) наприкінці процесу - розчин майже зникає з системи, і гідродинамічні умови здійснення процесу виморожування істотно змінюються за рахунок конвекції в стислих умовах, що є специфічним тільки для блочного виморожування. Але їх різка зміна не враховується відомими методами розрахунку, які коректні тільки для етапів 1 і 2. Таким чином, термодинамічна модель процесу рециклінгу льоду (рис.2а) враховує ступіневу конденсацію холодильного агенту: Q_{k1} - в штатному конденсаторі та Q_{k2} - в конденсаторі-плавителі, де здійснюється плавлення льоду з попереднього циклу з температурою плавлення $T_{пл}$. Отримано модель розрахунку режимів роботи виморожувальної установки з рециклінгом льоду.

Оскільки теплове навантаження на штатний конденсатор дорівнює $Q=kF\Delta t$ отримана залежність η' при рециклінгу льоду від умов здійснення попереднього холодильного циклу:

$$\eta' = \eta (1 - \Delta t) q_0 / q_k q'_0 \quad (1)$$

де η - напір температур при здійсненні базового холодильного циклу; η' - температурний напір при здійсненні рециклінгу льоду; q_k, q'_k - питомі теплоти конденсації базового холодильного циклу та рециклінга льоду; q_0, q'_0 - питомі холодовидатності базового циклу та рециклінгу льоду (рис.2б).

Процеси тепломасопереносу моделюються за допомогою чотирьох рівнянь (для температури і концентрації твердої та рідкої фаз) теплопровідності з відповідними граничними умовами:

- для температури твердої фази

$$c\sqrt{\rho} \partial t_1 / \partial \phi = \partial / \partial r (l \partial t / \partial r) + l / r (\partial t / \partial r) + (\partial / \partial z (l \partial t / \partial z)) / r^2 + \partial / \partial z (l \partial t / \partial z) \quad (2)$$

$$t_1(r_0, \phi) = t_0; t_1(z, \phi) = t_p(C_2(z+0, \phi)); t_1(r, 0) = t_p(C_0)$$

2) - для температури рідкої фази аналогічно (1);

3) оба рівняння теплопровідності доповнюються умовою Стефана

$$l \partial t(z-0, \phi) / \partial r - b(t_p - t_{ж}) = c q \partial z / \partial \phi \quad (3)$$

- для концентрації рідкої фази

$$\partial C_2 / \partial \phi = (D - C_2) + (L_{12} - t_2); \quad (4)$$

$$\partial C_2(r, \phi) / \partial r = 0; C_2(r, 0) = C_0; (C_2(z+0, \phi) - C_1(z-0, \phi)) \partial z / \partial \phi = D \partial C_2(z, \phi) / \partial r \quad (5)$$

де z - товщина шару, який закрісталізувався, ϕ - час процесу, r - радіус циліндру.

Система (2-5) є повною моделлю процесу кріоконцентрування з урахуванням перехресних ефектів Дюфо і Сорє (феноменологічні коефіцієнти L). Ця система містить п'ять невідомих функцій, які беруть участь як у рівняннях тепломасопереносу, так і у граничних умовах, що наводить до нелінійності задачі. Окрім того, коефіцієнти теплопровідності λ , щільність ρ і питома теплота льодоутворення q залежать від координат простору та часу, що потребує окремих

досліджень. Тому подальше моделювання доцільно проводити за допомогою теорії подібності при наступних припущеннях:

тепломасоперенос здійснюється на поверхні в обмеженому просторі між непроникними стінками. Кристалізація в об'ємі відсутня;

процес відбувається в умовах природньої конвекції, яка викликана температурним градієнтом; всі сухі речовини розчину розглядаються як один компонент з відомими теплофізичними властивостями;

задача розглядається для визначеного відрізка часу, в якому діють середні значення температур та концентрацій;

розчин в початковий момент часу знаходиться при температурі фазового переходу, тобто $t_{ж} = t_s$ при $\tau = \phi_0$;

температура поверхні льоду визначається криоскопічними умовами $t_{л} = t_s$;

зміна ентальпії твердої фази незначна порівняно з прихованою теплотою кристалізації $C_{пл} (t_s - t_{\infty}) \ll \Omega$.

Загальне рівняння теплового балансу має вигляд

$$Q = C_{pp} V_p c_p (\partial t / \partial \phi) + \Omega F_{л} (\partial r_{л} / \partial \phi) + Q_{пот} \quad (6)$$

З урахуванням наведених припущень для безрозмірної координати $x = (r_{л} - r_{и}) / (r_{к} - r_{и})$ визначається безрозмірний час наморозування

$$F_0 = (Ph / 2 (n+1)) (1 + 2 / Bi_T),$$

де Bi_T - число Біо теплове,

$$Bi_T = \delta_x r_T (\ln (r_{к} / r_T) / \lambda_{к} + \ln (r_{л} / r_{к}) / \lambda_{л}) \quad (7)$$

Ph - число фазового переходу;

$$Ph = c_{ж} \Omega / c_{л} C_{пл} (t_{ж} - t_s) \quad (8)$$

n - константа, яка характеризує форму блоку льоду, для циліндра $n = 1$; δ_x - коефіцієнт тепловіддачі від холодоагента до стінки кристалізатора, Вт/(м²К); r_T - внутрішній радіус стінки кристалізатора, м; $r_{к}$ - зовнішній радіус концентратора, м; $r_{л}$ - радіус блоку льоду, м; $\lambda_{к}$ - теплопровідність стінки кристалізатора, Вт/(мК); $\lambda_{л}$ - теплопровідність блоку льоду, Вт/(мК); $c_{ж}$, $c_{л}$ - густина розчину та льоду, кг/м³; Ω - питома теплота кристалізації, Дж/кг; $C_{пл}$, $C_{рл}$ - теплоємність блоку льоду, Дж/(кгК).

Наведена модель добре відображає теплове становище системи (якого не було в існуючих моделях), але не враховує особливостей масопереносу на границі "лід-розчин" при концентруванні харчових рідин, які є складними багатокомпонентними системами. Тому для визначення дійсного часу кристалізації її треба доповнити додатковим коефіцієнтом, який би враховував вказані недоліки. З урахуванням зміни ентальпії твердої фази та особливостей масопереносу на границі "лід-розчин" дійсний час процесу становить

$$\phi = \phi_0 \Psi_1 \Psi_2 \quad (9)$$

де Ψ_1 - коефіцієнт, який враховує зміну ентальпії твердої фази:

$$\Psi_1 = 1 + 1/2 (Bi_T / (Bi_T + 1))^{2/3} (\sqrt{1 + (2F_{л} r_{л} / V_{л}) / Ph} - 1); \quad (10)$$

де $F_{л}$ - площа поверхні блоку льоду, м²; $V_{л}$ - об'єм блоку льоду, м³;

Ψ_2 - коефіцієнт, який враховує специфіку масообмінних процесів, що відбуваються при блочному виморожуванні

$$\Psi_2 = A (Bi_d)^k; \quad (11)$$

Bi_d - число біо дифузійне

$$Bi_d = v r_T \ln (r_{л} / r_{к}) / D \quad (12)$$

де v - коефіцієнт інтенсивності масопереносу від розчину до блоку льоду, м/с²; D - коефіцієнт дифузії, м/с².

Оскільки існуючі методи розрахунку процесів блочного виморожування не

враховували особливості теплообмінних процесів при виморожуванні, результати отриманих критеріальних рівнянь мають похибку, яка зростає з часом процесу. Раніше визначалась необхідність урахування умов стислості при масопереносі на останньому етапі виморожування. З безрозмірним комплексом (d_v/h_d) в відомих критеріальних рівняннях можна погодитись лише для перших етапів виморожування, але він не враховує специфіку останнього етапу, на якому здійснюються найбільш значні зміни в системі. Оскільки головним параметром, який відображає стан системи в таких умовах, є товщина кільцевого зазору між стінкою концентратора та блоком льоду, то запропоновано модифікований параметр "K", який замість діаметру кристалізатору містить товщину кільцевого зазору $\Delta r = r_c - r_d$. Таким чином, в результаті моделювання процесів блочного виморожування встановлені основні напрямки експериментальних досліджень.

У **третьому розділі** наведено результати розрахунково-експериментальних досліджень процесів блочного виморожування з рециклінгом льоду. Характеристика об'єму дослідів наведена у табл.1. Описано експериментальні установки для визначення впливу конструктивних параметрів кристалізації на тепломасоперенос при блочному виморожуванні та рециклінгу блоку льоду на енергетичні показники виморожувальної установки.

Таблиця 1

Характеристика об'єму експериментальних досліджень

Параметр	Позначення	Діапазон вимірювання
Температура навколишнього середовища, °C	t_c	(+8) – (+20)
Температура кипіння хладагенту, °C	t_o	(-5) – (-20)
Температура розчину, °C	t_p	0 - (+5)
Час процесу, с	ϕ	1800 - 14400
Концентрація розчину, %	C_p	7 - 20

Вирішення задачі тепломасопереносу при блочному виморожуванні потребує знання деяких теплофізичних характеристик. На підставі аналітичних викладок, літературних даних та експериментальних досліджень отримано залежності для визначення коефіцієнтів об'ємного розширення молочної сироватки

$$r = 0,24 / (1061 - 0,24t + 4,12C) \quad (13)$$

де t - температура розчину, °C; C - його концентрація, %.

Для підтвердження адекватності отриманої моделі проведені експериментальні дослідження, які виконувались відповідно до розробленої методики. Досліди проводили на двох експериментальних установках.

Експериментальні дослідження кінетики льодоутворення показали, що швидкість росту блоку льоду залежить від температурного режиму виморожування, конструктивних параметрів кристалізатора та умов тепловіддачі між холодоносієм та стінкою кристалізатора. Зниження інтенсивності тепловіддачі в системі лід-холодоносій в 3 рази, яка обусловлена переходом від кипіння холодоагенту до системи з однофазним проміжним холодоносієм, зменшує швидкість виморожування в 1,3 рази при постійній температурі поверхні кристалізації (рис.3).

В результаті експериментальних досліджень по впливу конструктивних особливостей кристалізатора на процеси тепломасопереносу при блочному виморожуванні встановлено, що при верхньому положенні кристалізатора блок льоду зростає швидше, ніж при нижньому положенні (рис. 4). Окрім цього, для одного й того ж часу проведення процесу при верхньому положенні кристалізатора зменшуються втрати неводних компонентів з блоком льоду і досягається більша ступінь концентрування розчину (рис.5, 6). З рис.6 видно, що положення кристалізатора впливає не тільки на втрати продукту з блоком льоду, а і на швидкість їх зростання. Так, для нижнього положення (лінія 1) швидкість зростання втрат неводних компонентів з часом процесу перевищує швидкість зростання цих втрат для верхнього положення (лінія 3) кристалізатора, яка уздовж усього часу процесу залишається майже постійною.

Самостійною проблемою було вивчення впливу рециклінгу льоду на показники

виморожувальної установки. Експериментальні досліді проводили на установці принципову схему якої наведено на рис. 7. Визначали витрати енергії, температури у вузлових точках холодильної установки, параметри блоку льоду і розчину.

1 - $\delta=600 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, $C = 14\%$, $t = -10 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 - $\delta = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; $C = 14\%$; $t = -10 \text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 3. Вплив системи охолодження на інтенсивність масовіддачі при блочному виморожуванні.

Рис. 4. Швидкість росту блоку льоду 10% розчину цукру при різному положенні кристалізатора

В результаті експерименту встановлено, що при здійсненні рециклінгу льоду температура конденсації знижується на 9 - 12 $^\circ\text{C}$ порівняно з базовим циклом (рис. 8), а питома холодовидатність зростає на 10-18%. Вивчення параметрів енергоспоживання установки показало, що при здійсненні рециклінгу льоду енерговитрати на процес блочного виморожування зменшуються в 1,2-1,4 рази (рис.9).

Добре узгодження всіх даних дослідів досягається при використанні модифікованого параметричного комплексу K , що ілюструється рис.10. Задовільне узгодження експериментальних даних із моделлю (6-13) свідчить, що запропоновані гіпотези коректні. Результати математичної обробки масиву експериментальних даних дозволяють рекомендувати наступне критеріальне рівняння

$$Sh = 0,41Ra^{0,31} (Sc / Pr)^{1/3} ((r_k - r_n) / h_n)^{0,21} \quad (14)$$

1 - кристалізатор зверху; 2 - кристалізатор вертикально; 3 - кристалізатор знизу

Рис. 5. Залежність пористості від об'єму

Рис. 8. Залежність температури конденсації від температури навколишнього середовища

Рис. 9. Залежність питомої холодовидатності від температури при температурі кипіння холодоагенту - 10°C навколишнього повітря для $t_0=-10^\circ\text{C}$

яке описує інтенсивність масопереносу при блочному виморожуванні молочної сироватки, а також рівняння

$$\phi = 0,75\phi_0 \psi_1 (Bi_{d_n})^{0,1} \quad (15)$$

для розрахунку часу наморожування льоду на поверхні стрижневих кристалізаторів при блочному виморожуванні молочної сироватки. Ці рівняння, а також залежність (1) покладені до основи методики розрахунку процесів блочного виморожування.

У четвертому розділі наведена інженерна методика розрахунку у виді узагальненої структури і набору блок-схем для розрахунку самостійних етапів: теплофізичних властивостей, фазових рівноваг, кінетики масопереносу, часу наморожування та холодильної машини з рециклінгом льоду. Таке уявлення етапів розрахунку у вигляді окремих модулів є зручним для формування розрахункового алгоритму. На підставі запропонованих модулів складений алгоритм перевірного розрахунку (рис.12). Ключовим моментом у методиці розрахунку є узагальнена критеріальна залежність (10) та рівняння (15).

У п'ятому розділі на підставі розробленого алгоритму розраховано і зібрано пілотну установку та проведено її випробування. Порівняння результатів випробувань з розрахунками за наведеною моделлю показано на рис. 11, де 1 - залежність для ідеалізованого часу процесу; 2 - залежність для часу процесу з урахуванням ψ_1 ; 3 - час процесу з урахуванням ψ_1, ψ_2 , 4 - результати випробувань. Таким чином, введення додаткового поправкового коефіцієнту ψ_2 дозволяє знизити загальну похибку розрахунків за співвідношеннями (14-15) до рівню 5%. При цьому похибка основного технологічного параметру - концентрації сироватки, наприкінці процесу виморожування,

знаходиться у межах 10%. Точність розрахунку енергоспоживання установки 15%. Це підтверджує коректність запропонованої методики.

Проведено порівняння ефективності запропонованих рішень відносно до існуючих методів концентрування. Оскільки при здійсненні випаровування і кріоконцентрування використовують якісно неоднакові види енергії, аналіз проведено за допомогою ексергетичного методу.

1	Введення $t_{ж(0)}$, $C_{ж(0)}$, $C_{ж(k)}$, V_N , N , $d_{и}$, $d_{к}$, t_0 , $t_{окр.ср}$, $F_{КД}$, $K_{КД}$, $F_{т/о}$
2	Розрахунок конструктивних параметрів
3	Розрахунок пористості блоку льоду
4	Розрахунок параметрів фазової рівноваги та теплофізичних властивостей
5	Розрахунок β , ψ_1 , ψ_2 , ϕ
6	Розрахунок параметрів блоку льоду і розчину

При цьому отримані залежності витрат ексергії на здійснення випаровування, блочного виморожування з рециклінгом льоду та без нього від температури навколишнього середовища (рис.13).

Із збільшенням температури навколишнього середовища витрати ексергії на випаровування знижуються (рис.13), а на кріоконцентрування - зростають, але останні лишаються менше витрат ексергії на випаровування в досить широкому діапазоні зміни температур навколишнього середовища. За отриманими результатами були досліджені ступені ексергетичної ефективності методів блочного виморожування першого та другого покоління відносно до випаровування (рис.14).

1 - п'ятиступенева випарка; 2 - блочне виморожування з рециклінгом льоду;
3 - блочне виморожування без рециклінга льоду.

Рис. 13. Ексергетичні витрати для різних способів концентрування

Рис.14. Ексергетична ефективність різних способів концентрування

З рис. 14 видно, що ексергетична ефективність установок блочного виморожування, порівняно з п'ятиступеневою випарною системою, при умовах середньорічної температури навколишнього середовища для міста Одеси, сягає 0,65% для блочного виморожування з рециклінгом льоду та 0,54% для блочного виморожування без рециклінгу. Тобто технологія блочного виморожування ефективніша з ексергетичної точки зору за п'ятиступеневою випаркою на 54-65%.

За результатами випробувань розроблено проект багатофункціонального блочного виморожувача МБВ - 1, який може бути використан для вирішення наступних задач: концентрування соків, екстрактів, молочних продуктів, віноматеріалів, пива і т.п. до вмісту сухих речовин 35-50 %; отримання рідких (до 40 % сухих речовин) натуральних харчових барвників, ароматизаторів, купажів; дистиляція водопровідної води; опріснення солевих розчинів та морської води; очищення сточних вод підприємств; виробництво талої, біологічно активної води. Принципову схему агрегату наведено на рис.7. Технічні характеристики агрегату: видатність по льоду 1000 кг на добу. Потужність електроприводу 2,5 кВт.

Для оптимізації процесу блочного виморожування з рециклінгом льоду був проведений комп'ютерний експеримент. Оскільки основним критерієм ефективності запропонованої технології, окрім якості отриманого продукту, є енергетичні витрати на здійснення процесу розділення, то в якості цільової функції були обрані питомі витрати електроенергії, необхідні для видалення 1000 кг льоду з розчину (J , кВтгод / 1000 кг).

процесу виморожування: початкової концентрації розчину (рис.15), часу процесу (рис.16) та температури кипіння хладагенту.

Аналіз отриманих залежностей (рис.15) показав, що для кожної початкової концентрації розчину існує свій локальний мінімум, при чому при відхиленні температури кипіння від оптимального значення в сторону її збільшення питомі енерговитрати різко зростають та асимптотично наближуються до безконечності в точках, відповідних до криоскопічних умов системи в початковий момент часу. При збільшенні початкової концентрації розчину з 7 до 20 % значення оптимальної температури кипіння холодильного агенту знижується у 2 рази і зростають відповідні їм значення питомих енерговитрат (рис.15).

Отримані залежності питомих енерговитрат від часу процесу (рис.16) показали, що для усіх температур навколишнього середовища графіки $J = f(\phi)$ мають локальний мінімум при $\phi = 2$ год. При τ більше двох годин J зростає швидше, ніж при ϕ менше двох годин. Оскільки в межах $0 < \tau < 2$ год мінімум має розмитий характер, то можна рекомендувати значення $\tau = 1,5 - 2$ год. Проект агрегату МБВ - 1 прийнятий до виробництва на АТ "Машинобудівне виробниче об'єднання "Оріон".

Економічна ефективність агрегату МБВ - 1, в залежності від його функціонального призначення, становить 42-55 грн/т.

ВИСНОВКИ

Проведений комплекс аналітичних і експериментальних досліджень підтвердив справедливості наукового положення, що зображення процесів блочного виморожування у вигляді системи "холодильна машина-блок льоду-розчин", при зміні структури продукту (однофазна-трифазна-двофазна), дозволяє урахувати специфіку комбінованих процесів формування твердої фази та гідродинамічну ситуацію, що змінюється, за рахунок термодинамічних параметрів циклу холодильної машини і співвідношення теплового та дифузійного чисел Біо.

Управління градієнтами гравітаційного та дифузійних полей за рахунок тільки орієнтації кристалізатора дозволяє інтенсифікувати кінетику масопереносу на 10% (рис.4). Верхнє розташування кристалізатора при блочному виморожуванні дозволяє зменшити пористість блоку льоду в 1,3 рази (рис.5) та втрати сухих речовин з льодом на 30% (рис.6).

Вплив гідродинамічної ситуації в концентраторі враховується відношенням товщини радіального зазору, між стінкою концентратора та блоком льоду, до висоти блоку льоду. Тому використання в параметричному комплексі "К", в якості визначального параметра, товщини радіального зазору між блоком льоду та стінкою концентратора (замість діаметра кристалізатора) зменшує похибку розрахунків коефіцієнту масовіддачі (10) в 1,5 рази.

Використання поправкового коефіцієнта Ψ_1 , який враховує зміну ентальпії твердої фази, зменшує відносну похибку розрахунків кінетики кристалізації на 10%.

5. Використання поправкового коефіцієнту Ψ_2 , який враховує особливості масопереносу на границі "лід-розчин" дозволяє знизити похибку розрахунків основних технологічних параметрів процесу блочного виморожування до 3 %, порівняно з 10% для існуючих методів розрахунку цих процесів.

Визначальний вплив на режим роботи генератора холода з рециклінгом льоду мають параметри циклу базової холодильної машини (1). Енергоспоживання при здійсненні рециклінгу льоду зменшується на 15-30%.

7. На підставі ексергетичного аналізу існуючих способів концентрування встановлено, що, для умов України, витрати ексергії при блочному виморожуванні з рециклінгом льоду в 2,1-3,5 рази нижчі, ніж при традиційному випаровуванні.

Раціональними режимами блочного виморожування з рециклінгом льоду для молочної сироватки є триступеневе концентрування з температурами поверхні кристалізатора на першому ступені $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, на другому $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, на третьому $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тривалість процесу виморожування на кожному ступені 2 години (рис.13, 14).

9. Розроблену пілотну установку впроваджено в учбовий процес, а її дослідно-промисловий зразок багатофункціонального блочного виморожувача пройшов стадію проектування та його виробництво здійснюється на АТ "Оріон". Економічна ефективність від впровадження установки в залежності від її функціонального призначення становить 42-55 грн/т, порівняно з класичними технологіями кріоконцентрування.

Перелік робіт, що опубліковані за темою дисертації

1. Бурдо О.Г., Коваленко О.О., Мілінчук С.І. Енергозбереження в холодильних технологіях // Зб. наук. пр. – Одеса: ОДАХТ. – 1999. – Вип. 19. – С.258-263.

2. Захаров М.Д., Бурдо О.Г., Зиков О.В., Мілінчук С.І. Новітні теплотехнології в харчових виробництвах / Вісник державного університету "Львівська політехніка": "Проблеми економії енергії", № 2. – Львів, 1999. – С.129-132.

3. Бурдо О.Г., Мілінчук С.І., Коваленко О.О. Моделювання процесів тепломасопереносу при блочному виморожуванні // Зб. наук. пр. – Одеса: ОДАХТ. 1999. – Вип. 20. – С.214-218.

4. Низкотемпературная технология переработки сельскохозяйственного сырья / Е.А. Коваленко, А.К. Бурдо, В.П. Мордынский, С.И. Милинчук // Сб. науч. ст. ОЦНТИ: Пути повышения эффективности хранения и переработки сельскохозяйственной продукции. – Одесса, 1999. – С.84-88.

5. Рішення про видачу патенту на винахід за реєстраційним номером заявки 99094963, МПК 7 A23L2/08. Спосіб концентрування рідких харчових продуктів/ Бурдо О.Г., Светличний П.І., Мілінчук С.І., Заявлено 07.09.99. Дата прийняття рішення 19.01.2001.

6. Коваленко О.О., Бурдо А.К., Мілінчук С.І. Технологія та обладнання для виробництва рідких харчових кріоконцентратів // Матеріали конференції "Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості". - Київ: УДУХТ. - Ч.1. - 2000. - С. 71.

7. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Коваленко Е.А. Сопряженный тепломассоперенос при кристаллизации из пищевых растворов // IV Минский международный форум, т.5. - Минск: АНК "Институт тепло- и массообмена ИМ А.В. Лыкова" НАНБ. - 2000. - С. 399-408.

8. Гулиев Р.Р., Милинчук С.И., Терзман Е.Ф., Бурдо О.Г. Снижение энергопотребления при разделении гетерогенных систем вымораживанием // Зб. наук. пр. "Проблеми та перспективи розвитку виробництва та споживання хлібопродуктів", т. 6. - Одеса: ОДАХТ. - 1997. - С. 35-37.

9. Бурдо О., Коваленко О., Мілінчук С., Бурдо А. Кріоконцентрування в харчових технологіях // Тези доповідей X міжнародної конференції "Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв" (ICSE - 99). - Львів: Державний університет "Львівська політехніка". - 1999. - С. 102.

10. Захаров Н.Д., Бурдо О.Г., Зыков А.В., Милинчук С.И. Приоритетные направления энергозбереження в пищевых теплотехнологиях // Тезисы докладов международной научно-практической конференции "Региональные проблемы энергосбережения в производстве и потреблении энергии". - Киев, 1999. - С. 99-100.

11. Бурдо О.Г., Терзиев В.Г., Зыков А.В., Милинчук С.И. Пути решения проблем энергетики и экологии в пищевых технологиях // Materialy XV11 Miedzynarodowa Konferencja Naukowa "Inzynieria procesowa w ochronie srodowiska". - Opole: Otmuchow, 1999. - P. 33 - 36.

АНОТАЦІЯ

Мілінчук С.І. Моделювання тепломасопереносу та зниження енерговитрат при блочному виморожуванні. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та апарати харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв.

Одеська державна академія харчових технологій, Одеса, 2001.

Дисертація присвячена проблемам ефективного і раціонального використання енергії,

накопиченої в блоці льоду при криоконцентруванні методом блочного виморожування, а також удосконаленню існуючих методів розрахунку таких процесів. В роботі сформульована і доведена наукова гіпотеза, сутність якої в тому, що системний аналіз і урахування структури блоку льоду, яка змінюється, дозволяють вирішити спряжену гідро-масообмінну задачу формування твердої фази при блочному виморожуванні, узгоджену з термодинамічною моделлю генератора холоду. Наведено, що рециклінг льоду на другому ступені конденсатора в комплексі вирішує проблеми гравітаційного сепарування, плавлення блоку і підвищує енергетичну ефективність генератора холоду. На підставі аналітичного та експериментального моделювання визначена структура модифікованого критеріального рівняння, залежності кінетики льодоутворення та втрат неводних компонентів з блоком льоду від конструктивних особливостей кристалізатора. Розроблена інженерна методика розрахунку, запатентована принципова схема виморожувальної установки. Виконан комплекс комп'ютерного моделювання, на підставі якого визначені раціональні режими роботи виморожувальної установки в залежності від різних сполучень конструктивних та режимних параметрів.

Ключові слова: блочне виморожування, концентрування, інтенсивність масопереносу, рециклінг льоду, енергозбереження.

АННОТАЦІЯ

Милинчук С.И. Моделирование тепломассопереноса и снижение энергопотребления при блочном вымораживании. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и аппараты пищевых, микробиологических и фармацевтических производств.

Одесская государственная академия пищевых технологий, Одесса, 2001.

Диссертация посвящена проблемам эффективного и рационального использования энергии, накопленной в блоке льда при криоконцентрировании методом блочного вымораживания, а также совершенствованию существующих методов расчета таких процессов.

В работе проведен сравнительный анализ основных известных производственных способов получения криоконцентратов и существующих методов расчета процессов криоконцентрирования. Проанализированы возможные направления совершенствования технологии блочного вымораживания с целью повышения ее энергоэффективности.

Рассмотрена термодинамическая модель процесса блочного вымораживания, на основании которой исследованы причины увеличения погрешности существующих методов расчета. Уточнена структура критериального уравнения, описывающего массопередачу при блочном вымораживании.

Разработана математическая модель сопряженного тепломассопереноса при блочном вымораживании, учитывающая не только условия массоотдачи, но и влияние типа системы охлаждения. С помощью термодинамической модели представлено обоснование целесообразности применения рециклинга льда. Установлена максимальная степень снижения энергозатрат. Разработана математическая модель режимов работы вымораживающей установки, адекватность которой подтверждена экспериментальными исследованиями.

Исследован процесс формирования блока льда: показано влияние типа системы охлаждения и конструктивных особенностей кристаллизатора на продолжительность концентрирования, кинетику льдообразования, распределение сухих веществ в блоке льда.

Результаты экспериментальных данных обобщены в критериальной форме. Показано, что модифицированное критериальное уравнение удачно корректирует опытные точки в зависимости от режимов работы установки.

Разработана инженерная методика расчета, основанная на наборе блок-схем для расчета отдельных ее этапов: теплофизических свойств, фазовых равновесий, кинетики массопередачи, времени кристаллизации, параметров работы вымораживающей установки с рециклингом льда. Сравнение результатов расчета по предложенной методике с данными экспериментальных исследований показало, что погрешность расчета температуры и концентрации раствора в пределах 10%, а параметров вымораживающей установки 10-15%.

Рассмотрены предложения по практическому использованию технологии блочного

вымораживания с рециклингом льда. Запатентована принципиальная схема вымораживающей установки, работающей по этому принципу.

Ключевые слова: блочное вымораживание, концентрирование, интенсивность массопереноса, рециклинг льда, энергосбережение.

ANNOTATION

Milinchuk S.I. Modeling of heat-mass transfer and reduction of energy inputs in the process of block freezing. – Manuscript.

Thesis on competition of scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.18.12 – processes and mechanisms for food, microbiological and pharmaceutical industries.

Odessa state academy of the food technologies, Odessa, 2001.

The thesis is devoted to the problems of effective and rational energy utilization accumulated in the ice block in the process of cryoconcentration by means of block freezing as to the issues of the existing techniques development which are used for calculation of such processes.

A scientific hypothesis has been formulated and proved in this thesis. The essence of this hypothesis is the following: systems analysis and monitoring of the changing product structure allows to solve a conjugated hydro-mass-exchange problem of a solid phase formation in the process of block freezing, consistent with thermodynamical model of a cold generator. It is demonstrated that recycling of the ice block on the second stage of a condenser allows to solve problems of gravitational separation, block melting and to increase cold generation power efficiency in a comprehensive manner. The structure of the modified criterial equation was determined on the basis of experimental and analytical modeling. There were determined dependencies of ice formation kinetics and losses of nonaqueous components with the ice block upon the design features of a crystallizer. Engineering design procedure was developed. The principal circuit of the freezing plant was patented. A computer experiment was made in order to optimize operating modes of the plant for different combinations of operating conditions and construction characteristics.

Key words: block freezing, concentrating, mass transfer intensity, ice recycling, energy-saving.

Підписано до друку 28.04.2001р. Формат 60х90/16
Об.-вид. арк. 1,2. Зак. № 26 Тираж 100 прим.
Одеська державна академія харчових технологій
65039, вул. Канатна, 112