

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЄВДОКИМОВА ОКСАНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 664:628.3.034.2.045.5

**ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМОРОЖУЮЧИХ
УСТАНОВОК ДЛЯ ОПРІСНЕННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ
ПРИРОДНОЇ І ПРОМИСЛОВОЇ ВОД**

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Одеса-2007

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник:

– кандидат технічних наук,
Коваленко Олена Олександрівна,
Одеська національна академія харчових
технологій, кафедра процесів та апаратів,
докторант

Офіційні опоненти:

– доктор технічних наук, професор,
Ханик Ярослав Миколайович,
Національний університет “Львівська
Політехніка”, завідувач кафедри хімічної
інженерії

– кандидат технічних наук,
Мілінчук Сергій Іванович,
Одеська національна академія харчових
технологій, кафедра безпеки життєдіяльності,
доцент

Захист відбудеться 30 листопада 2007 р. о 10.30 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 41.088.01 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою:

65039, м. Одеса-39, вул. Канатна, 112.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса-39, вул. Канатна, 112.

Автореферат розісланий 30 жовтня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д.т.н, професор

К. Г. Іоргачова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Україна відноситься до країн, малозабезпечених ресурсами прісної води. Разом з тим, розвиток промисловості, техногенні аварії, зростання міст та покращення побутових умов для населення сприяють інтенсивному забрудненню природних водоймищ, підвищенню їх мінералізації і збільшенню дефіциту прісної води. Ще однією проблемою для України є низька якість питної води. Обумовлено це не тільки забрудненістю джерел питного водозабезпечення, а і незадовільним станом ряду очисних споруд та водотранспортних мереж. Згідно інформаційних джерел, сьогодні до 45 % населення України, переважно в промислово - розвинутих регіонах споживає питну воду, що не відповідає існуючим стандартам і є причиною серйозних захворювань. Крім того,

використання неякісної питної води при виробництві алкогольних і безалкогольних напоїв, відновлених соків та інших концентрованих продуктів негативно відображається на їх якості. В ситуації, що склалася, актуальними є дослідження, пов'язані із розробкою та вдосконаленням обладнання для опріснення природних і промислових вод, а також для доочищення питної води в побутових і промислових умовах. Підтвердженням цього є затверджена загальнодержавна програма “Питна вода в Україні” терміном на 2006...2020 роки.

Оскільки високомінералізована і питна вода, а також промислові стоки є водними розчинами неорганічних і органічних речовин, то для їх опріснення та доочищення використовуються процеси, метою яких є розділення розчину на чисту (або умовно чисту) воду та концентрат домішок. Одним із таких процесів є процес виморожування. Цей процес сьогодні широко не застосовується, однак ряд таких його переваг, як низька енергоємність процесу кристалізації води й унікальні властивості вимороженої води викликають до нього інтерес і є передумовою його подальшого вдосконалення.

Серед виморожуючих установок особливе місце займають установки, які здійснюють спрямовану кристалізацію води із розчину на теплопередаючій поверхні. До класу таких установок відноситься блочний виморожувач, розроблений в ОНАХТ. Застосування блочних виморожувачів для опріснення та доочищення природної води і промислових стоків стримується відсутністю методик розрахунку процесів тепло- і масообміну при блочному виморожуванні води із сольових розчинів, а також відсутністю обґрунтованих режимних характеристик процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до держбюджетної тематики науково-дослідної лабораторії ОНАХТ та кафедри процесів та апаратів (“Теория и техника низкотемпературного разделения жидких систем пищевых производств” № держреєстрації 0106U001442)

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є створення методики розрахунку та обґрунтування режимних характеристик блочних виморожувачів для опріснення та очищення природної і промислової вод.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- виконати аналітичне та експериментальне моделювання теплофізичних властивостей сольових розчинів, а також експериментальні дослідження кріоскопічних умов сольових розчинів;

вдосконалити математичну модель процесів тепло- і масопереносу при блочному виморожуванні води із сольових розчинів на поверхні вертикальних кристалізаторів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину;

виконати експериментальні дослідження кінетики процесів блочного виморожування води із сольових розчинів на поверхні вертикальних кристалізаторів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину;

узагальнити результати експериментальних досліджень;

визначити закономірності зміни фізико-хімічних показників сольових розчинів в процесі блочного виморожування;

розробити методику розрахунку блочного виморожувача для опріснення природних і промислових вод та доочищення питної води;

оптимізувати та обґрунтувати режимні характеристики процесу.

Об'єкт дослідження – процеси тепло- і масопереносу при блочному виморожуванні води із розчинів на поверхні вертикальних кристалізаторів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину.

Предмет дослідження – кінетика процесів блочного виморожування води із сольових розчинів, режимні характеристики процесу.

Методи досліджень – теорія подібності і метод аналізу розмірностей, методи теплофізичного моделювання; сучасні експериментальні методи з використанням контрольно-вимірювальних приладів; аналітичні дослідження з використанням обчислювальної техніки.

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

– визначено рівняння для розрахунку густини промислових стоків виноробного підприємства в залежності від масової частки розчинних речовин та температури розчину, а також отримана кріоскопічна крива промислових стоків виноробного підприємства і уточнена кріоскопічна крива для морської води Чорного моря; отримані графічні залежності, що відображають кінетику процесів блочного виморожування води із сольових розчинів на поверхні вертикальних кристалізаторів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину;

отримані критеріальні рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепло- і масовіддачі в розчині при блочному виморожуванні води із сольових розчинів на поверхні вертикальних кристалізаторів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину;

визначені фізико-хімічні показники зразків водопровідної, колодязної, морської вод та стоків виноробного підприємства до та після блочного виморожування.

Практичне значення одержаних результатів. На основі виконаних аналітичних і експериментальних досліджень розроблені методики та алгоритми для розрахунку: теплофізичних властивостей сольових розчинів; кріоскопічних температур сольових розчинів; процесів тепло- і масопереносу при блочному виморожуванні води із сольових розчинів на поверхні вертикальних кристалізаторів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину; конструктивних та техніко-економічних характеристик установки, які можуть використовуватися для проектування блочних виморожувачів.

В результаті проведеної оптимізації отримані доцільні режими роботи блочних виморожувачів для опріснення природної та промислової води та доочищення питної води. Отримано позитивне рішення на спосіб опрісненої води шляхом блочного виморожування.

В умовах лабораторії Українського науково-дослідного інституту медицини та транспорту (м. Одеса) отриманні характеристики хімічного складу природних та промислових вод до і після блочного виморожування. Дослідженнями підтверджено ефективність застосування цього способу для опріснення та доочищення води.

Проведена апробація зразків вимороженої води в умовах бази відпочинку “Парус” (м. Білгород-Дністровський, Одеська обл.), та в умовах АТ Миколаївського пивзаводу “Янтар”

(м. Миколаїв). Розраховано, що економічний ефект від впровадження блочного виморожувача (продуктивність - $0,25 \text{ м}^3$ на добу за вимороженою водою, кількість робочих днів за сезон - 120) на базі відпочинку "Парус" становитиме 9000 грн., а сума економічного ефекту від впровадження блочного виморожувача (продуктивність - $0,7 \text{ м}^3/\text{год}$ за вимороженою водою) у схему водопідготовки на підприємстві АТ Миколаївський пивзавод "Янтар" становитиме 169 тис. грн., при цьому термін окупності становитиме 2,2 роки.

Особистий внесок здобувача. Полягає у аналізі літературних джерел за темою досліджень; проведенні експериментальних досліджень; виступах з доповідями на конференціях; формулюванні висновків та рекомендацій, участі у впровадженні дослідно-експериментальних результатів та підготовці матеріалів до публікацій. Розробка математичних моделей, планування експериментальних досліджень та їх узагальнення проводилось спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ОНАХТ в 2004-2007 рр.; міжнародній науково-технічній конференції "Харчові технології" (Одеса, 2005-2006); XI міжнародній науковій конференції "Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв" (Одеса, 2006); міжнародній науково-практичній конференції школи-семинар "Повышение энергетической эффективности пищевых и химических производств" (Одеса, 2007); науковій конференції аспірантів і студентів "Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів" (Донецьк, 2007); 72-ій науковій конференції молодих вчених, аспірантів та студентів "Наукові здобутки молоді вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті" (Київ, НУХТ, 2007); на третій міжнародній науково-практичній конференції "Наукові дослідження – теорія та експеримент" (Полтава, 2007).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 13 друкованих праць: 6 у фахових виданнях, тези 7 доповідей на наукових конференціях. Отримане позитивне рішення про видачу патенту.

Структура та об'єм роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, що включає 164 найменування вітчизняних та зарубіжних авторів на 15 сторінках та 5 додатків на 20 сторінках. Робота викладена на 171 сторінці основного тексту, містить 71 рисунок на 36 сторінках та 23 таблиці на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, показано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача в проведених дослідженнях та публікаціях за темою дисертаційної роботи.

В першому розділі "Стан питання по використанню виморожуючих установок для опріснення і доочищення природних і промислових вод" показано, яке значення вода має у життєдіяльності людини, сучасний рівень стану водних ресурсів, а також вплив якості природних і промислових вод на здоров'я людини, навколишнє середовище та технологічні процеси. Наведена характеристика способів опріснення та доочищення природних і промислових вод. Показано, що спосіб виморожування є перспективним для вирішення цих задач. Представлені теоретичні та технічні основи застосування виморожуючих установок для розділення сольових розчинів. Наведена характеристика, принцип роботи та відзначені переваги блочного виморожувача серед інших виморожуючих установок. В результаті аналізу робіт, присвячених вивченню процесів блочного виморожування (Бурдо О.Г., Альзгул-Бассам, Коваленко О.О, Мілінчук С.І., Мординский В.П. та ін.) сформульовані задачі досліджень, які необхідно вирішити щоб створити методики розрахунку, вдосконалити та

обґрунтувати режимні характеристики блочних виморожувачів для опріснення природних і промислових вод, а також доочищення питної води.

У другому розділі “Моделювання процесів блочного виморожування води із сольових розчинів” наведено фізичні моделі процесів блочного виморожування води із сольових розчинів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину. На основі уявлень про фізичні моделі, представлені рівняння матеріального і теплового балансу. Кінетика процесів тепло- і масообміну в блочному виморожувачі відображена рівняннями потоків теплоти і маси в структурних елементах моделі. Аналіз кінетичної моделі показав, що для практичного її застосування необхідним є визначення середніх коефіцієнтів тепло- (α , Вт/(м²·К)) і масовіддачі (β , м/с) у розчині. Також необхідними є відомості про теплофізичні властивості розчину (густина (ρ_r , кг/м³); динамічний коефіцієнт в'язкості (μ_r , кг/(м·с)); питому теплоємність (c_r , Дж/(кг·К)); коефіцієнт теплопровідності (λ_r , Вт/(м·К)), температурний коефіцієнт об'ємного розширення (β_r , К⁻¹) і криоскопічну температуру ($t_{кр}$, °С).

Для визначення коефіцієнтів α і β в умовах природної конвекції використовувались рівняння традиційної структури, а саме для розрахунку тепловіддачі – α , а для розрахунку масовіддачі – β . В цих рівняннях Sh, Gr, Sc, Nu, Pr – числа подібності Шервуда, Грасгофа, Шмідта, Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля, відповідно, а C, A, a, d – константи та показники степеню, що визначаються експериментально і відображають особливості тепло- і масовіддачі в розчині в умовах блочного виморожування.

Для умов механічного перемішування розчину вид рівнянь для розрахунку α і β було отримано з використанням принципів теорії подібності і методу аналізу розмірностей. При формуванні рівняння для розрахунку тепловіддачі в розчині в якості незалежних змінних були прийняті наступні параметри: товщина зазору між внутрішньою стінкою ємності для розчину і фронтом кристалізації (δ_r , м); діаметр мішалки (d_M , м); частота обертів мішалки ($n_{меш.}$, с⁻¹); ρ_r ; μ_r ; λ_r . Після розв'язання системи рівнянь, складеної для основних одиниць, і пошуку комбінацій одержано структуру рівняння в узагальнених змінних для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі:

(1)

де C, d, f, a, – константа та показники степеню, що визначаються в результаті математичної обробки комплексу експериментальних даних; K – безрозмірний параметр, який розраховується наступним чином:

При формуванні рівняння для розрахунку масовіддачі в розчині в якості незалежних змінних були прийняті наступні параметри: δ_r ; d_M ; $n_{міш.}$; c_r ; μ_r ; коефіцієнт дифузії компоненту, який переважає у розчині (D, м²/с). Аналогічним чином, як і у випадку з визначенням залежності для коефіцієнту тепловіддачі, було одержано структуру рівняння в узагальнених змінних для розрахунку коефіцієнта масовіддачі:

(2)

де A, c, h, b – константа та показники степеню, що визначаються в результаті математичної обробки комплексу експериментальних даних.

В якості визначаючих параметрів при розрахунку тепло- і масовіддачі в розчині як для умов природної конвекції, так і для умов механічного перемішування розчину використовувались температура (t), масова частка розчинних речовин (ω) і конструктивний розмір (d). В цих залежностях: t_0 – визначаюча температура, °C; $t_{т.п.}$ – температура на теплопередаючій поверхні °C; $t_{р-ну}$ – температура розчину, °C; ω_0 – визначаюча концентрація, %; $\omega_{р-ну}$ – масова частка розчинних речовин поблизу фронту кристалізації, %; $\omega_{р-ну}$ – масова частка розчинних речовин у розчині, %; d_{ϵ} – діаметр ємності для розчину, м; $d_{\text{льоду}}$ – діаметр блоку льоду, м.

Для розрахунку теплофізичних властивостей морської води, модельних розчинів NaCl та питної води наведені рівняння, які отримані в результаті математичної обробки літературних даних.

Представлені методики експериментального моделювання коефіцієнтів тепло- і масовіддачі в розчині при блочному виморожуванні з нього води в умовах природної конвекції і при механічному перемішуванні. Також наведені методики для визначення: кріоскопічних температур сольових розчинів; характеристик розчинів (температури, маси, об'єму, масової частки розчинних речовин у розчині) і блоку льоду (висоти, діаметру), а також конструктивних елементів установки (діаметру та висоти кристалізатора і ємності для розчину). Представлені методики узагальнення експериментальних досліджень процесів тепло- і масовіддачі в розчині. Наведені методики оцінки похибок досліджень.

У третьому розділі “Експериментальні дослідження процесів тепло- і масообміну при блочному виморожуванні води із сольових розчинів” представлені результати експериментальних досліджень кріоскопічних температур сольових розчинів та густини. Також представлені результати експериментальних досліджень кінетики процесів блочного виморожування в умовах природної конвекції і при механічному перемішуванні розчину. Наведені результати узагальнення експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження кріоскопічних температур ($t_{кр}$, °C) проводились для морської води Чорного моря (м. Одеса) і промислових стоків виноробного підприємства, що утворюються після миття тари і обладнання (м. Одеса). Результати цих досліджень представлені у вигляді кривих охолодження (рис. 1) і кріоскопічних кривих (рис. 2).

В результаті математичної обробки експериментальних даних за кріоскопічними дослідженнями отриманні рівняння для розрахунку $t_{кр}$, °C:

– морської води:

$$t_{кр} = -0,0084 \cdot \omega + 0,0074 \cdot \omega^2 - 0,9524 \cdot \omega^3, \quad (3)$$

– стоків виноробного підприємства:

$$t_{кр} = -2,0267 \cdot \omega + 10,486 \cdot \omega^2 - 12,72 \cdot \omega^3 - 2,4398 \cdot \omega^4, \quad (4)$$

Рівняння (3) справедливе в діапазоні зміни $\omega_{р-ну}$ від 1 до 5 %, а рівняння (4) в діапазоні зміни $\omega_{р-ну}$ від 0,1 до 1 %. Відносна похибка розрахунків за рівнянням (3) складає 0,7 %, а за рівнянням (4) – 2,3 %.

При експериментальних дослідженнях густини стоків виноробного підприємства (ρ_r ,

кг/м³) вивчався вплив $t_{p-ну}$ і $w_{p-ну}$ на зміну значення цього показника. В результаті математичної обробки експериментальних даних отримано рівняння виду:

$$\rho_p = 999,6 + 0,04 \cdot t_{p-ну} - 24,6 \cdot \omega_{p-ну} - 0,0053 \cdot t_{p-ну} \cdot w_{p-ну} + 310,6, \quad (5)$$

Рівняння (5) справедливе в діапазоні зміни $w_{p-ну}$ від 0,1 до 1 % і температур від 0 до 15 °С. Відносна похибка розрахунку за рівнянням (5) складає 0,2 %.

Метою кінетичних досліджень процесів блочного виморожування води із сольових розчинів в умовах природної конвекції було визначення впливу початкової масової частки розчинних речовин розчину ($\omega_{п.р-ну}$, %), температурного режиму роботи установки ($t_{хл}$, °С), а також конструктивних параметрів установки, а саме діаметру та висоти кристалізатора (d_k , h_k , м) і діаметру ємності

($d_е$, м) на поточні значення: $w_{p-нут}$, $t_{p-нут}$, маси розчину ($m_{p-нут}$, кг), об'єму розчину ($V_{p-нут}$, м³), діаметру ($d_{льодут}$, м) і висоти блоку льоду ($h_{льодут}$, м). На основі отриманих даних розраховувалися: ступінь концентрування розчину

($w_{p-нут}/\omega_{п.р-ну}$), масова частка розчинних речовин розплаву блоку льоду

($\omega_{льодут}$, %), об'єм ($V_{льодут}$, м³) і маса блоку льоду ($m_{льодут}$, кг). Також метою кінетичних досліджень було вивчення характеру радіального розподілу температур і концентрацій в структурних елементах блочного виморожувача. Діапазон зміни режимних параметрів кінетичних досліджень процесів блочного виморожування води із сольових розчинів в умовах природної конвекції представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Діапазон зміни режимних параметрів в кінетичних дослідженнях

Параметри	Розчин			
	модельний розчин NaCl	морська вода	стоки виноробного підприємства	водопровідна вода
$\omega_{п.р-ну}$, %	0,002 – 0,25	1 – 1,25	0,15 – 0,19	0,04
$t_{п.р-ну}$, °С	5,5 – 21,5	7 – 15,6	4,7 – 10,5	12
$V_{п.р-ну}$, 10 ⁻³ м ³	0,2 – 1,5	1 – 1,5	1 – 1,5	1
$t_{хл}$, °С	-2,5 – -7	-4,5 – -6,6	-5 – -10	-3,5 – -7

Дослідження кінетики процесів тепло- і масообміну в блочному виморожувачі здійснювались на модельних розчинах NaCl, морській воді, стоках виноробного підприємства, водопровідній воді. Експериментальні дослідження проводились на трьох установках, які відрізнялися конструктивними розмірами та системами охолодження. В розділі наведені їх схеми та характеристика. Деякі результати експериментальних досліджень процесів блочного виморожування води із сольових розчинів в умовах природної конвекції представлені у вигляді графічних залежностей. Залежності відображають зміну кінетичних параметрів розчину (рис. 3) і блоку льоду (рис. 4) протягом процесу виморожування. Умовні позначення до рис. 3 і 4 представлені в табл. 2.

Умовні позначення до рис. 3 і 4

№	Розчин	$\omega_{n.p-ну}$, %	$V_{n.p-ну}$, м ³	$t_{хл.}$, °С	d_K , м	d_C , м
1	модельний розчин NaCl	0,1	$0,25 \cdot 10^{-3}$	-3,5	0,018	$6,5 \cdot 10^{-2}$
2				-5		
3				-7		
4		0,02		-5		
5		0,25		-5		
6		0,1		-5		$5 \cdot 10^{-2}$
7	морська вода	1	$1 \cdot 10^{-3}$	-6		$8,5 \cdot 10^{-2}$
8				-5		
9	стоки виноробного підприємства	0,19	$1 \cdot 10^{-3}$	-5		
10	морська вода	1,27	$1,5 \cdot 10^{-3}$	-5	0,045	$15 \cdot 10^{-2}$

Аналіз результатів кінетичних досліджень процесів тепло- і масообміну в блочному виморожувачі в умовах природної конвекції, дозволив сформулювати характерні закономірності цих процесів:

- із зниженням $t_{хл.}$ збільшується швидкість охолодження розчину, при цьому конструктивні параметри блоку льоду збільшуються, а $\omega_{p-нут}$ / $\omega_{п.р-ну}$ зменшується;
- із зростанням $\omega_{п.р-ну}$ зменшується $\omega_{p-нут}$ / $\omega_{п.р-ну}$, збільшується $\omega_{льодут.}$, а охолодження розчину та інтенсивність виморожування води із розчину відбувається більш повільніше;

із зменшенням d_C зростає швидкість охолодження розчину та виморожування з нього води відбувається більш інтенсивніше, але вміст розчинних речовин у розплаві блоку льоду також зростає.

В розділі також наведені результати хімічних досліджень зразків водопровідної води (м. Одеса), морської води Чорного моря, стоків виноробного підприємства, колодязної води (с. Олександрівка, Одеської обл.) до та після блочного виморожування. Аналіз цих

досліджень показав, що блочне виморожування є ефективним при очищенні таких розчинів. Наприклад, результати хімічного аналізу колодязної води, показали, що суттєво знизився вміст кальцію, магнію, гідрокарбонатів, хлоридів, нітратів, заліза, сульфатів і практично не змінився вміст алюмінію та показник рН.

В результаті досліджень характеру радіального розподілу температур в структурних елементах блочного виморожувача “ізоляція-стінка ємності для розчину - розчин - блок льоду - стінка кристалізатора - холодоносій” і концентрацій в розчині отриманні залежності, які представлені на рис. 5.

Аналіз цих досліджень дозволив зробити наступні висновки:

– температурне поле в блочному виморожувачі нерівномірне;
в перші 30...60 хв процес виморожування відбувається при значному градієнті температур між температурою розчину і температурою теплопередаючої поверхні. При цьому інтенсивність охолодження розчину і блоку льоду висока, а зміна масової частки розчинних речовин у розчині дуже не значна, хоча поблизу приграничного шару вона в 1,6...1,7 рази вище, ніж у розчині. Очевидно, що в блок льоду переходить значна кількість розчинних речовин розчину. Це обумовлює зменшення коефіцієнту теплопровідності вимороженого шару, зниження швидкості охолодження розчину і виморожування з нього води.

наступний період процесу характеризується зниженням інтенсивності теплових процесів і підвищенням інтенсивності переносу розчинних речовин від приграничного шару в розчин. Підтвердженням цього є зростання масової частки розчинних речовин у розчині і зниження кількості розчинних речовин, які потрапляють у блок льоду.

Представлені результати досліджень кінетики процесу сепарування блоку льоду. Вивчався вплив температурного режиму процесу сепарування на зміну кінцевих параметрів блоку льоду ($u_{к.льоду}$, $V_{к.льоду}$). Аналіз цих досліджень показав, що із зниженням температурного режиму процесу сепарування, підвищується якість очищення блоку льоду від розчину, який знаходиться в його порах. Однак при цьому тривалість процесу сепарування збільшується. Дослідження полів температур і концентрацій, а також кінетики процесу сепарування показали необхідність інтенсифікації процесів тепло- і масообміну в блочному виморожувачі з метою впливу на приграничний шар для зменшення масової частки розчинних речовин в ньому. Показано, що одним із шляхів вирішення такої задачі є організація процесу блочного виморожування з механічним перемішуванням розчину.

В розділі наведена характеристика експериментального стенду і методика досліджень. Метою експериментальних досліджень кінетики блочного виморожування води із сольових розчинів при механічному перемішуванні розчину було вивчення впливу частоти обертів мішалки ($n_{міш}$, об/хв) на зміну поточних значень параметрів розчину ($u_{р-нут}$, $t_{р-нут}$, $V_{р-нут}$) та блоку льоду ($d_{льодут}$, $h_{льодут}$). На основі отриманих даних розраховувалися наступні параметри: $u_{р-нут}/\omega_{п.р-ну}$, $\omega_{льодут}$, $V_{льодут}$, $m_{льодут}$. Діапазон зміни режимних параметрів процесу наведено в табл. 3. Число Re_M (табл. 3) відповідає початковим умовам процесу.

Таблица 3

Діапазон зміни режимних параметрів

Параметри	№ кривої						
	1	2	3	4	5	6	7
$\omega_{п.р-ну}, \%$	0,1						
$t_{п.р-ну}, \text{°C}$	21,2	20,9	21,2	21,2	21,2		
$n_{міш}, \text{об/хв}$	100	240	380	520	660		
Число Рейнольдса, Re_M	543	1300	2050	2830	3570		

Дослідження проводилися на модельному розчині NaCl, при $t_{хл.} = -5 \text{ °C}$; $V_{п.р-ну} = 0,00025 \text{ м}^3$. Результати експериментальних досліджень процесів виморожування при механічному перемішуванні розчину представлені у вигляді графічних залежностей (рис. 6 - 7). Аналіз результатів цих досліджень дозволив сформулювати наступні характерні закономірності:

- в діапазоні $100 < n_{міш} < 660 \text{ об/хв}$ ступінь концентрування розчину збільшується, інтенсивність охолодження розчину і виморожування води із нього підвищується. при подальшому збільшенні $n_{міш}$ інтенсивність процесу теплообміну зростає, а масообміну зменшується. Свідченням цього є зменшення ступеня концентрування розчину і збільшення масової частки розчинних речовин в блоці льоду.

В результаті математичної обробки кінетичних експериментальних досліджень розраховані (при $t_{хл.} = -5 \text{ °C}$, $\omega_{п.р-ну} = 0,1 \%$ і $V_{п.р-ну} = 0,00025 \text{ м}^3$) середні значення і для умов природної конвекції у розчині і при його механічному перемішуванні. Результати порівняння експериментальних і розрахункових значень і представлені на рис. 8 і в табл. 4. Порівняльний аналіз показав, що використання механічного перемішування при блочному виморожуванні води із сольових розчинів інтенсифікує процеси тепло- і масовіддачі в 1,5...1,7 рази і 2,2...2,5 рази відповідно.

Таблиця 4

Порівняльний аналіз для умов природної конвекції у розчині і при його механічному перемішуванні

$\tau, \text{с}$	$q, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	
	$n_{міш} = 520 \text{ об/хв}$	без перемішування
600	620,2	365,9
1200	8,06	10,5
1800	1,18	4,28
5400	0,03	0,24

Експериментальні дослідження по тепло- і масовіддачі в сольових розчинах при блочному виморожуванні з них води узагальненні у вигляді критеріальних рівнянь. Результати узагальнення наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати узагальнення експериментальних даних

Рівняння	Діапазон зміни чисел подібності, похибка рівняння
Блочне виморожування в умовах природної конвекції у розчині	
теповіддача в розчині:	$660 \ll 23,6 \cdot 10^5; 8,2 \cdot 10^{-4} < Nu < 18$ похибка рівняння – 13 %

масовіддача в розчині:	$15 \cdot 10^5 < (Gr \cdot Sc) < 27 \cdot 10^6$; $260 << 3220$, похибка рівняння – 8 %
Блочне виморожування при механічному перемішуванні розчину	
тепловіддача в розчині:	$400 < Re_M < 3700$; $8,6 < Pr < 13$; $0,525 < K < 0,875$; $1,4 \cdot 10^{-2} < Nu < 28$, похибка рівняння – 16 % $400 < Re_M < 3700$; $8,6 < Pr < 13$; $0,142 < K < 0,525$; $3 \cdot 10^{-4} < Nu < 1,4 \cdot 10^{-2}$, похибка рівняння – 18 %
масовіддача в розчині:	$400 < Re < 3700$; $1114 < Sc < 1338$; $0,142 < K < 0,875$; $1010 << 11000$, похибка рівняння – 12 %

У четвертому розділі “Інженерні методи розрахунку блочних виморожувачів води із сольових розчинів” представлена загальна структура розрахунку блочного виморожувача, а також методики і алгоритми для розрахунку: теплофізичних властивостей і кріоскопічних температур сольових розчинів; кінетики процесів тепло- і масообміну в блочному виморожувачі для умов природної конвекції в розчині і при його механічному перемішуванні; конструктивних розмірів, холодопродуктивності, потужності та техніко-економічних параметрів установки. Методики базуються на результатах аналітичних та експериментальних досліджень, представлених в розділах 2 і 3.

Наведені результати порівняння експериментальних і розрахованих за методиками кінетичних параметрів процесу. Аналіз цих результатів показав, що розбіжність між експериментальними і розрахунковими значеннями параметрів знаходиться в прийнятних для технічних розрахунків межах.

Для визначення раціонального режиму роботи блочного виморожувача була проведена оптимізація режимних характеристик установки. В якості критерію оптимізації було прийнято питому собівартість 1 м^3 вимороженої води (C , грн/м³). Метою оптимізації було визначення температурного режиму і режиму перемішування, при яких критерій оптимізації має мінімум. Для визначення оптимальних режимів роботи блочного виморожувача проводили серію комп’ютерних експериментів. Аналіз результатів цих експериментів показав, що при $t_{\text{хл.}} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ критерій оптимізації має мінімум, рис. 9.

Аналіз результатів оптимізації режиму роботи блочного виморожувача при механічному перемішуванні розчину, показав, що питома собівартість 1 м^3 вимороженої води має мінімум $Re_M = 2830$.

Таким чином, встановлено, що раціональними режимами блочного виморожування води із природних і промислових вод з метою їх опріснення та очищення є температурний режим роботи установки, який відповідає $t_{\text{хл.}} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ для умов природної конвекції в розчині, а для умов механічного перемішування раціональним є режим, який відповідає $Re_M = 2830$.

Висновки

1. В роботі, на основі аналітичних і експериментальних досліджень, оптимізації та апробації експериментальних апаратів доведено, що блочні виморожувачі є перспективними для опріснення та очищення природних і промислових вод.

Розроблена методика розрахунку блочних виморожувачів та обґрунтовані їх режимні характеристики.

Отримано експериментальні моделі кріоскопічних температур у вигляді регресійних рівнянь з урахуванням масової частки розчинних речовин у розчині для стоків виноробного підприємства в діапазоні від 0,1 до 1 % і для морської води Чорного моря від 1 до 5 %. Також отримано регресійне рівняння для розрахунку густини промислових стоків виноробного підприємства з урахуванням масової частки розчинних речовин у розчині в діапазоні від 0,1 до 1 % та температур від 0 до 15 °С.

2. Встановлені кінетичні закономірності процесів тепло- і масообміну при блочному виморожуванні води із сольових розчинів на поверхні вертикальних кристалізаторів в умовах природної конвекції:

- при підвищенні початкової масової частки розчинних речовин у розчині в 2,5... 12,5 рази ступінь концентрування розчину зменшується в 1,14...1,54 рази, розчин охолоджується повільніше в 2...2,2 рази, а інтенсивність виморожування води із розчину зменшується в 1,1...1,6 рази;

при зниженні температурного режиму роботи установки в 2 рази ступінь концентрування розчину зменшується в 1,05...1,12 рази, кінцева температура розчину - в 2,1 рази, а кінцева маса розчину - в 1,17 рази;

при зменшенні діаметру ємності в 1,3 рази розчин охолоджується швидше і інтенсивність виморожування води із розчину зростає в 1,96 - 2,55 рази.

3. Встановлено, що в процесі блочного виморожування кольоровість і мутність, наприклад колодязної води, знизилася у 2,5 рази, жорсткість у 5 разів, лужність у 2 рази, вміст кальцію, натрію, гідрокарбонатів, хлоридів, нітратів, сульфатів у 4...7,5 рази, а нітритів у 10 разів, що підтверджує ефективність блочного виморожування для опріснення та очищення природних і промислових вод.

Встановлено, що масова частка розчинних речовин поблизу приграничного шару протягом першого періоду процесу в 1,6...1,7 разів перевищує масову частку розчинних речовин у розчині. Це є причиною погіршення якості опріснення розчину і вказує на необхідність інтенсифікації процесів тепло- і масообміну в блочному виморожувачі.

Встановлено вплив режиму перемішування на кінетичні закономірності процесів блочного виморожування води із сольових розчинів на поверхні вертикальних кристалізаторів:

- в діапазоні $100 < n_{\text{міш}} < 660$ об/хв ступінь концентрування розчину зростає в 1,4 рази, а масова частка розчинних речовин у блоці льоду зменшується в 1,5 рази, розчин швидше охолоджується і інтенсивність виморожування води із розчину підвищується в 1,4 рази;

при подальшому збільшенні частоти обертів мішалки, інтенсивність процесів теплообміну зростає, а масообміну - зменшується.

4. Отримано критеріальні рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі і масовіддачі при блочному виморожуванні води із сольових розчинів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину.

Розроблена інженерна методика розрахунку блочного виморожувача, яка може

використовуватись для проектування промислових установок та оптимізації їх режимних характеристик.

Обґрунтовані раціональні режимні характеристики блочного виморожувача, а саме для блочного виморожування при природній конвекції у розчині є режим при $t_{\text{хл.}} = -5 \text{ } ^\circ\text{C}$, а при перемішуванні є режим, якому відповідає

$$\text{Re}_M = 2830.$$

Економічний ефект від впровадження блочного виморожувача (продуктивність - 0,25 м³ на добу за вимороженою водою, кількість робочих днів за сезон - 120) на базі відпочинку “Парус” становитиме 9000 грн., а сума економічного ефекту від впровадження блочного виморожувача (продуктивність - 0,7 м³/год за вимороженою водою) у схему водопідготовки на підприємстві АТ Миколаївський пивзавод “Янтар” становитиме 169 тис. грн., при цьому термін окупності становитиме 2,2 роки.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Евдокімова О.А. Применение метода вымораживания для водоподготовки в пищевых производствах / О.А. Евдокімова, Е.А. Коваленко // Зб. наук. пр. ОНАХТ – 2006. – Вип. 28. – Т. 1. – С. 110 – 115.

Здобувач виконала експериментальні дослідження кінетики процесів блочного виморожування води із модельних розчинів в умовах природної конвекції.

2. Евдокімова О.А. Экспериментальные исследования кинетики процессов опреснения морской воды и обезвоживания сточных вод методом блочного вымораживания / О.А. Евдокімова, Е.А. Коваленко // Зб. наук. пр. ОНАХТ – 2006. – Вип. 28. – Т. 2. – С.16 – 21.

Здобувач експериментально отримала криоскопічні криві для морської води Чорного моря і стоків виноробного підприємства та дослідила їх фізико-хімічні показники до та після блочного виморожування.

3. Евдокімова О.А. Обобщение экспериментальных исследований процессов блочного вымораживания воды из солевых растворов в условиях механического перемешивания раствора / О.А. Евдокімова, Е.А. Коваленко // Зб. наук. пр. ОНАХТ – 2007. – Вип. 30, – Т. 1. – С.157 – 163.

Здобувач виконала експериментальні дослідження кінетики процесів блочного виморожування води із сольових розчинів та узагальнила результати досліджень.

4. Бурдо О.Г. Процессы низкотемпературного опреснения природных вод и обезвоживания промышленных стоков /О.Г. Бурдо, Е.А. Коваленко, О.А. Евдокімова // Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2006. – Вип. 45. – С. 108 – 114.

Здобувач виконала експериментальні дослідження температурних полів і полів концентрацій при блочному виморожуванні води із сольових розчинів

5. Коваленко О.О. Технології виморожування води із розчинів та їх роль у вирішенні актуальних проблем харчових виробництв / О.О. Коваленко, О.О. Євдокимова, Л.П. Ремінна // Аграрний вісник Причорномор'я. Вип. 37. – Одеса: Імідж - Прес, 2007. – С. 134 – 137

Здобувач дослідила фізико-хімічні показники зразків водопровідної води до та після блочного виморожування.

6. Коваленко О. Кріотехнології. Можливості їх застосування у харчовій промисловості / О. Коваленко, О. Євдокимова, Л. Реміна // Харчова і переробна промисловість – 2007. – № 8 – 9. – С. 27 – 29.

Здобувач здійснила аналіз сучасних методів знешкодження промислових стоків.

7. Коваленко Е.А. Опреснение и очистка природных вод и промышленных стоков методом блочного вымораживания / Е.А. Коваленко, О.А. Евдокимова // Тези 71 наук. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов “Научные достижения молодежи – решению проблем харчування людства у ХХІ столітті. – Київ, НУХТ. – Ч 2. – 2005. – С.127.

Здобувач обґрунтувала перспективи застосування блочного виморожувача для цілей опріснення та доочищення природної і промислової води.

8. Коваленко Е.А. Вымораживающие установки для водоподготовки в пищевых производствах / Е.А. Коваленко, О.А. Евдокимова // Тези доп. Міжн. наук. – практ. конф. “Харчові технології – 2005”. – Одеса. 2005. – С. 25.

Здобувач здійснила літературний огляд сучасних методів опріснення.

9. Євдокимова О.О. Блочные виморожувачі для опріснення природних вод і обезвоження промислових стоків / О.О. Євдокимова, О.О. Коваленко, О.Г. Бурдо // Тези доп. Міжн. наук.-техн. конф. “Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка” – Донецьк: ДонДУЕТ, 2005. – С. 62 – 63.

Здобувач обґрунтувала можливість використання блочних виморожувачів для опріснення природних вод і обезводнення промислових стоків.

10. Коваленко Е.А. Доочистка, обессоливание и обезвоживание солевых растворов пищевых производств методом блочного вымораживания / Е.А. Коваленко, О.А. Евдокимова, С.А. Малашевич // Тези доп. II Міжн. наук. – практ. конф. “Харчові технології – 2006”. – Одеса. – 2006. – С. 75.

Здобувач отримала критеріальні рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепло- і масовіддачі при блочному виморожуванні води із сольових розчинів в умовах природної конвекції, та розробила методику розрахунку апарату.

11. Євдокимова О.О. Інтенсифікація процесів виморожування води із сольових розчинів / О.О. Євдокимова, О.О. Коваленко // Тези 73 наук. конф. молодих вчених, аспирантів і студентів “Научные достижения молодежи – решению проблем харчування людства у ХХІ столітті. – Київ, НУХТ. – 2007 – С. 147.

Здобувач отримала кінетичні залежності процесів тепло- і масопереносу блочного виморожування води із сольових розчинів при механічному перемішуванні розчину.

12. Євдокимова О.О. Розробка блочного виморожувача для знесолення високомінералізованих природних вод та обезвожування промислових стоків / О.О. Євдокимова, О.О. Коваленко // Збірка доп. VI Міжн. наук. конф. асп. і студ. “Охорона

навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів” – Т. 1 – Донецьк.: ДонНТУ, ДонНУ, – 2007. – С. 116 – 117.

Здобувач дослідила фізико-хімічні показники зразків колодязної води до та після блочного виморожування.

13. Євдокимова О.А. Проблема дефіцита пресной воды и пути ее решения с помощью холодильных технологий / О.А. Євдокимова, Е.А. Коваленко // Зб. доп. III Міжн. наук. – практ. конф. “Наукові дослідження – теорія та експеримент 2007” – Т. 8. – Полтава. – 2007. – С. 22 – 26.

Здобувач здійснила аналіз існуючих холодильних технологій для опріснення сольових розчинів.

14. Позит. рішення на заявку № u 2007 03845 Спосіб отримання прісної води шляхом виморожування / О.Г. Бурдо, О.О. Коваленко, О.О. Євдокимова, заявл. 06.04.07., опубл.

АНОТАЦІЯ

Євдокимова О. О. “Обґрунтування режимних характеристик виморожуючих установок для опріснення та очищення природної і промислової води”.

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, Одеса, 2007.

Представлені результати математичного та експериментального моделювання теплофізичних властивостей та кріоскопічної різниці температур сольових розчинів, а також процесів тепло- і масообміну при блочному виморожуванні води із них в умовах природної та вимушеної конвекції. Наведені результати експериментальних досліджень полів температур і концентрацій в блочному виморожувачі, кінетики процесу сепарування, зміни хімічного складу природних і промислових вод до і після блочного виморожування. Результати узагальнення експериментальних досліджень представлені у вигляді рівнянь для розрахунку кріоскопічної різниці температур для морської води Чорного моря та промислових стоків, рівняння для розрахунку густини промислових стоків, критеріальних рівнянь для розрахунку коефіцієнтів тепло- і масовіддачі при блочному виморожуванні води із розчинів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину. Наведено методики розрахунку кінетичних, конструктивних та техніко-економічних параметрів блочного виморожувача та обґрунтовані режими його роботи при опрісненні та очищенні природних і промислових вод.

Ключові слова: опріснення, блочне виморожування, математичне і експериментальне моделювання, узагальнення, оптимізація.

АННОТАЦІЯ

Євдокимова О. А. “Обоснование режимных характеристик блочных вымораживателей для опреснения и очистки природных и промышленных вод”

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и аппараты пищевых, микробиологических и фармацевтических производств, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2007.

В работе доказано, что блочные вымораживатели являются перспективными для целей опреснения и очистки природных и промышленных вод. Представлены результаты математического и экспериментального моделирования теплофизических свойств и криоскопических температур солевых растворов, а также процессов тепло- и массообмена при блочном вымораживании из них воды в условиях естественной и вынужденной конвекции в растворе.

Приведены результаты экспериментальных исследований полей температур и концентраций в блочном вымораживателе, кинетики процесса сепарирования. Анализ результатов этих исследований показал, что массовая доля растворённых веществ вблизи пограничного слоя на протяжении первого периода процесса в 1,6...1,7 раз превышает массовую долю растворённых веществ в растворе. Это является причиной ухудшения качества опреснения раствора и указывает на необходимость интенсификации процессов тепло- и массообмена в блочном вымораживателе.

Представлены результаты исследований химического состава водопроводной воды, морской воды Черного моря, стоков винодельческого предприятия, колодезной воды до и после блочного вымораживания. Анализ результатов этих исследований показал, что метод блочного вымораживания эффективен при очистке таких растворов. Так, например, результаты химического анализа колодезной воды показали, что такие показатели, как цветность и мутность уменьшились в 2,5 раза, жесткость в 5 раз, щелочность в 2 раза, содержание гидрокарбонатов, хлоридов, кальция, натрия, сульфатов в 4...7,5 раз, содержание нитратов в 10 раз.

Результаты обобщения экспериментальных исследований представлены в виде регрессионных уравнений для расчета криоскопических температур для морской воды Черного моря и промышленных стоков винодельческого предприятия, уравнения для расчета плотности промышленных стоков винодельческого предприятия. В результате обобщения кинетических экспериментальных исследований получены критериальные уравнения для расчёта коэффициентов тепло- и массоотдачи при блочном вымораживании воды из солевых растворов в условиях естественной конвекции и при механическом перемешивании раствора.

Общая структура расчета блочного вымораживателя включает в себя методики и алгоритмы для расчета: теплофизических свойств и криоскопических температур солевых растворов; кинетики процессов тепло- и массообмена в блочном вымораживателе для условий естественной конвекции в растворе и при его механическом перемешивании; конструктивных размеров установки; холодопроизводительности и потребляемой мощности установки; технико-экономических параметров установки. Предложенная инженерная методика расчёта блочного вымораживателя, может использоваться для проектирования промышленных установок и оптимизации их режимных характеристик.

Установлено, что рациональными режимами блочного вымораживания воды из природных и промышленных вод с целью их опреснения и очистки является температурный режим работы установки, которому соответствует $t_{\text{хл.}} = -5$ eC для условий естественной конвекции в растворе, а для условий механического перемешивания рациональным является режим, которому соответствует $Re_M = 2830$.

Ключевые слова: опреснение, блочное вымораживание, математическое и экспериментальное моделирование, обобщение, оптимизация.

THE SUMMARY

Evdokimova O.O. Ground of block freezers regime descriptions for natural and industrial waters desalinating and treatment

Thesis for competition the scientific degree of Ph.D. in technical science by specialty 05.18.12 – Processes and equipment for food, microbiological and pharmaceutical industries, Odessa national academy of the food technologies, Odessa, 2006.

The results of mathematical and experimental design of thermo-physical properties and salt solutions temperatures freezing difference are presented in work. The processes of thermo and mass transfer at the water block freezing from them in the conditions of natural and forced convection also are presented.

The results of experimental researches of the temperatures and concentrations fields in block

freezer and kinetics of separation process are presented. Also in the work are presented the changes of chemical composition of natural and industrial wasters before and after block freezing. The results of generalization of experimental researches are presented as equalizations for the calculation of the Black sea water and industrial sewages of vine-making enterprise temperatures freezing difference and equalization for the calculation of density of vine-making enterprise industrial sewages, criterion equalizations for the calculation of thermo and mass exchange coefficients at the water block freezing from salt solutions in the natural and forced convection conditions.

Key words: desalination, block freezing, mathematical and experimental design, generalization, optimization.

Підписано до друку 25.10.07 р. Формат 60x90/16.
Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 1025
Видавничий центр Одеської національної академії харчових технологій
65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112