

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КОВАЛЕНКО ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 001.89:664.066.045.5

**НАУКОВО - ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО
РОЗДІЛЕННЯ РІДКИХ СИСТЕМ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

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

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Одеса-2007

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий
консультант:**

доктор технічних наук, професор,
Бурдо Олег Григорович,
Одеська національна академія харчових технологій,
кафедра процесів та апаратів, завідувач кафедри

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України
Малежик Іван Федорович,
Національний університет харчових технологій, кафедра
процесів і апаратів харчових виробництв та технології
консервування, завідувач кафедри

доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України
Павлюк Раїса Юріївна,
Харківський державний університет харчування та
торгівлі, кафедра технології консервування,
завідувач кафедри

доктор технічних наук, професор,
залужений діяч науки і техніки України
Онщенко Володимир Петрович,
Одеська державна академія холоду, кафедра інженерної
теплофізики, завідувач кафедри

Захист відбудеться "20" грудня 2007 р. о 10³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Канатна 112, м. Одеса, 65039.

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

Автореферат розісланий " ____ " _____ 2007 р.

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

К.Г. Іоргачова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Збереження здоров'я нації – пріоритетна задача кожної держави. Одним із шляхів вирішення такої задачі є виробництво та споживання якісних харчових продуктів та питної води. Відомо, що органолептичні показники, вміст біологічно-активних речовин та цінність харчових продуктів, а також якість питної води і безпечність для екологічної системи стічних вод, що утворюються і знешкоджуються на харчових виробництвах, залежить від технологічних процесів, які використовуються для обробки вихідної сировини.

Широке застосування в харчових технологіях отримали процеси концентрування рідких харчових продуктів (соків, екстрактів, молока, молочної сироватки, вина, пива), а також процеси опріснення та доочищення природної і промислової води. Інтерес до них обумовлений тим, що концентровані продукти та питна вода є основною сировиною для виробництва відновлених соків, алкогольних і безалкогольних напоїв та інших продуктів, попит на які постійно зростає, а опріснення стічних вод сприяє зменшенню дефіциту прісних водних ресурсів. В умовах зростаючої конкуренції на ринку харчових продуктів та в умовах погіршення екологічної ситуації в Україні вимоги до процесів концентрування і опріснення підвищуються, а питання щодо їх вдосконалення стають більш актуальними.

Загальним для процесів концентрування та опріснення є розділення вихідної рідкої сировини на воду, що не містить (або містить незначну кількість) сухих речовин та концентрований рідкий залишок. Тому доцільним вважається застосування до цих процесів терміну – “процеси розділення”. Загальним для рідких харчових продуктів, а також питної води і промислових стоків є те, що вони представляють собою водні розчини сукупності органічних та неорганічних речовин, а це дозволяє характеризувати їх як “рідкі системи харчових виробництв”.

Одним із процесів, який використовується для розділення рідких систем харчових виробництв, є процес виморожування або процес низькотемпературного розділення. Перевагами даного процесу є висока якість концентрованого продукту та унікальні властивості вимороженої води, а також низька енергоємність процесу видалення води із продукту і відсутність проблем, пов'язаних із пригоранням продукту, утворенням накипу та регенерацією робочих елементів. Сьогодні дослідженням та вдосконаленням процесів низькотемпературного розділення рідких систем харчових виробництв займаються в Європі, Америці, Китаї, Японії, Росії, Молдавії. Над вирішенням цієї проблеми активно працюють і в Україні, а саме в Одесі, Харкові, Києві, Донецьку, інституті винограду і вина “Магарач”. Значний внесок в розвиток теоретичних основ процесу льодоутворення в харчових системах, дослідження якості продуктів, отриманих в результаті низькотемпературної обробки та вдосконалення процесів і обладнання для кріотехнологій зробили вітчизняні та закордонні вчені: Чижов Г.Б., Гуйго Е.І., Каухчешвілі Е.І., Камовніков Б.П., Воскобойніков В.А., Плотніков В.Т., Філаткін В.М., Комяков О.Г., Лейбензон Л.С., Ткачов О.Г., Бучко Н.А., Шаталіна І.М., Зеленська Н.І., Папп Л., Тіссен Н.А., Бурдо О.Г., Павлюк Р.Ю., Гулий І.С., Чумак І.Г., Оніщенко В.П., Парцхаладзе Е.Г., Філін С.О., Смірнов Л.В. та інші. Разом з тим, застосування процесів виморожування в Україні дуже обмежене, а промислового виробництва виморожуючих установок

немає взагалі. Однією із причин такої ситуації є відсутність на сьогоднішній день науково-технічних основ, які б дозволяли оцінювати ефективність того чи іншого способу або режиму виморожування (як з економічної точки зору, так із позиції якості кінцевого продукту) і на основі цієї оцінки формувати рекомендації щодо їх застосування. Вирішенню цієї проблеми присвячена дана робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі процесів та апаратів і в проблемній науково-дослідній лабораторії відповідно до тематики науково-дослідних робіт ОНАХТ: “Усовершенствование криотехнологий и оборудования для концентрирования и фракционирования пищевых жидкостей” (№ держреєстрації 0197U016064), “Концептуальные основы создания ресурсосберегающих технологий АПК” (№ держреєстрації 0100U004572), “Розробка стратегії, принципів та методології удосконалення енерготехнологій АПК” (№ держреєстрації 0103U003436), “Теория и техника низкотемпературного разделения жидких систем пищевых производств” (№ держреєстрації 0106U001442). При розробці зазначених тематик здобувач виконував роль відповідального виконавця.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка теоретичних і практичних основ, спрямованих на підвищення ефективності роботи виморожуючих установок та розвиток в Україні їх виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- сформулювати структуру показника, який дозволить визначати ефективність виморожуючих установок та оптимізувати їх режимні і конструктивні параметри;

- вдосконалити математичну модель процесів тепло- і масопереносу в установках, в яких виморожування води із розчину здійснюється на зовнішній поверхні трубчастих кристалізаторів;

- обґрунтувати структуру та отримати рівняння для розрахунку рівноважної температури при фазовому перетворенні “розчин→лід+розчин”. Розрахувати кріоскопічні криві харчових розчинів;

- дослідити експериментально теплофізичні властивості рідких систем харчових виробництв і вимороженої фази, які необхідні для розрахунку виморожуючих установок і відомості про які відсутні;

- виконати комплекс експериментальних досліджень за задачами, сформульованими при математичному моделюванні процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці та узагальнити результати цих досліджень;

- визначити напрямки інтенсифікації процесів тепло- і масообміну у виморожуючих установках, сформулювати механізми впливу різних способів інтенсифікації на кінетичні закономірності цих процесів та підтвердити їх експериментально;

- розробити методики і комп'ютерні програми, необхідні для розрахунку та оптимізації режимних і конструктивних параметрів виморожуючої установки;

- розробити принципові схеми та визначити напрямки застосування виморожуючих установок на харчових виробництвах;

- виконати техніко-економічне обґрунтування щодо застосування виморожуючих установок в харчовій промисловості;

- розробити технічне завдання на виготовлення виморожуючої установки та

технічну документацію на виробництво продукції, отриманої в результаті низькотемпературного розділення рідких систем харчових виробництв;

визначити фізико-хімічні, мікробіологічні та санітарно-гігієнічні показники продукції, яка буде отримана шляхом низькотемпературного розділення у виморожуючих установках;

провести промислову апробацію виморожуючої установки та зразків продукції на підприємствах галузі.

Об'єкт дослідження - процес виморожування та виморожуюча установка для розділення рідких систем харчових виробництв.

Предмет дослідження - показник ефективності виморожуючих установок; математична модель, кінетичні залежності, інтенсифікація та розрахунок процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці; рівноважна температура при фазовому перетворенні “розчин → лід+розчин”; теплофізичні властивості розчинів; режимні, конструктивні та техніко-економічні параметри виморожуючої установки; фізико-хімічні, санітарно-гігієнічні та мікробіологічні показники зразків продукції до і після виморожування.

Методи досліджень – методи кваліметрії, теорія подібності, метод аналізу розмірностей, методи теплофізичного моделювання, методи оптимізації, фізико-хімічні та мікробіологічні методи, експериментальні дослідження з використанням контрольно-вимірювальної апаратури та аналітичні дослідження з використанням ПЕОМ.

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

1. Режимні і конструктивні параметри виморожуючої установки оптимізуються за комплексним показником якості, сформованим з використанням принципів і методів кваліметрії. При цьому функціональний зв'язок між одиничними показниками визначається впливом температурного режиму роботи установки на її техніко-економічні характеристики та технологічні параметри кінцевого продукту.

2. Умовне розділення вимороженої твердої фази на ряд прошарків (внутрішні і фронтальний) дозволяє врахувати вплив зміни в процесі їх теплофізичних властивостей на кількість теплоти, що виділяється при фазовому перетворенні розчину та температуру на фронті кристалізації.

3. Виморожування води із розчину в умовах інтенсифікації процесів тепло- і масообміну сприяє підвищенню ефективності роботи виморожуючої установки, що відображається у зростанні ступеня концентрування розчину, зменшенні вмісту розчинних речовин у розчині біля фронту кристалізації, підвищенні інтенсивності виморожування води із розчину та скороченні тривалості процесу низькотемпературного розділення рідких систем харчових виробництв.

Також вперше:

обґрунтована структура комплексного показника якості виморожуючих установок;

отримане рівняння для розрахунку рівноважної температури розчину при фазовому перетворенні “розчин → лід+розчин” в залежності від хімічного складу розчину та активності води у рідкій та вимороженій фазах;

отримане рівняння для розрахунку температури на фронті кристалізації при умовах змінної температури і масової частки розчинних речовин у розчині;

отримане рівняння для розрахунку масової частки розчинних речовин у розчині в залежності від різниці температур між температурою на фронті кристалізації і температурою розчину;

отримані залежності для визначення густини соків (чорносмородинового, шовковичного, апельсинового) і промислових стоків виноробних підприємств, які утворюються в процесі технологічної обробки тари та обладнання;

отримане рівняння для розрахунку коефіцієнту теплопровідності вимороженої фази в залежності від масової частки розчинних в ній речовин;

обґрунтована необхідність, способи та механізми інтенсифікації процесів тепло- і масообміну у виморожуючих установках з направленою кристалізацією води із розчину та формуванням твердої фази у вигляді блоків льоду;

отримані закономірності процесів виморожування води із природних і промислових вод, а також соків і екстрактів на поверхні вертикальних кристалізаторів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину;

отримані критеріальні рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепло- і масовіддачі при виморожуванні води із рідких систем харчових виробництв в умовах природної конвекції і при механічному перемішуванні розчинів;

визначені фізико-хімічні, мікробіологічні та санітарно-гігієнічні показники продукції, отриманої шляхом низькотемпературного розділення вихідної сировини;

обґрунтовані принципові технологічні схеми застосування виморожуючих установок в харчових виробництвах.

Практичне значення одержаних результатів: З використанням розроблених методик і програм розраховано параметричний ряд, оптимальні режимні і конструктивні параметри, а також техніко-економічні характеристики виморожуючих установок з потужністю за вихідною сировиною від 200 до 10000 кг за цикл.

Підготовлено і затверджено технічне завдання на виробництво блочних виморожувачів типу БЛС-П та технічну документацію на виробництво дослідної партії “Напою алкогольного “Глінтвейн” з кріоекстрактами пряно-ароматичної сировини” (ТУ У 15.9-26303655-30:2005).

Виконаним порівняльним техніко-економічним аналізом технологій, що використовують різні способи розділення рідких систем харчових виробництв, а також порівняльним аналізом фізико-хімічних показників якості продукції, отриманої за допомогою різних технологій, обґрунтовано доцільність застосування виморожуючих установок на вітчизняних харчових виробництвах.

Зразки продукції, отриманої в результаті низькотемпературного розділення та виморожуючі установки були апробовані у виробничих умовах на ТОВ “Ланжерон і К” (Одеська обл., Роздільнянський р-н), базі відпочинку “Парус” (м. Білгород-Дністровський, Одеська обл.), ТОВ агрофірмі “Эврика” (м. Одеса), АТ Миколаївському пивзаводі “Янтар” (м. Миколаїв). Для зазначених виробництв розраховані показники економічної ефективності.

Результати, одержані при виконанні дисертаційної роботи, можуть бути

рекомендовані до використання в науково-дослідних і проектно-конструкторських установах харчового машинобудування, а також у навчальних закладах III і IV рівнів акредитації, що займаються підготовкою спеціалістів у галузі розробки та експлуатації технологій і обладнання для низькотемпературної обробки харчових продуктів.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, формулюванні наукових положень, їх теоретичному та експериментальному підтвердженні, розробці програми досліджень і керівництві з її реалізації, проведенні аналітичних, експериментальних досліджень та їх аналізі, формулюванні висновків, підготовці матеріалів до публікації та складанні заявок на винаходи, розробці нормативної документації, проведенні заходів з упровадження науково - технічних розробок у виробництво. Ряд досліджень було проведено спільно з аспірантами Євдокимовою О.О., Харенко Д.О., Токаревою Л.М., Ремінною Л.П. У матеріалах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать основні ідеї, наукове обґрунтування теоретичних положень, постановка експериментів і аналіз отриманих результатів, формулювання і узагальнення основних висновків.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ОНАХТ в 1995 - 2007 р.р., на методичній конференції "Людина та навколишнє середовище – проблеми безперервної екологічної освіти в вузах" (Одеса, 1996 р.), на українсько-польській науково-технічній конференції "Сучасні проблеми водопостачання і знешкодження стічних вод" (Львів, 1996 р.), на міжнародному симпозиумі "Fifth international heat pipe symposium" (Мельбурн, Австралія, 1996 р.), на 12 міжнародному конгресі "Chemical and process engineering" (Прага, Чеська республіка, 1996 р.), на IX міжнародній конференції "Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв" (Одеса, 1996 р.), на третьому міжнародному семінарі "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators" (Мінськ, Білорусь, 1997 р.), на міжнародній конференції "Экология человека и проблемы воспитания молодых ученых" (Одеса, 1997 р.), на X міжнародній конференції "Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв" (ІССЕ-99, Львів, 1999 р.), на IV Мінському міжнародному форумі "Тепломассобмен ММФ-2000" (Мінськ, Білорусь, 2000 р.), на шостій міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості" (Київ, 2000 р.), на I міжнародному симпозиумі "Biochimie si biotehnologii in Industria Alimentara" (Кишинів, Молдова, 2002 р.), на 5-тій міжнародній науково-практичній конференції "Управління ефективним енерговикористанням" (Одеса, 2003 р.), на третій міжнародній виставці "Електроника и энергетика 2003" та другій спеціалізованій виставці "Станкомаш экспо 2003" (Одеса, 2003 р.), на міжнародних науково-технічних конференціях "Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка" (Донецьк, 2003 та 2005 р.р.), на міжнародній науково-технічній конференції "Енергоефективність 2004" (Одеса, 2004 р.), на регіональному семінарі країн центральної та східної Європи "Maitrise et gestion de la qualite dans l'industrie

alimentaire” (Кишинів, Молдова, 2004 р.), на міжвузівській науково-практичній конференції „Проблеми техніки і технологій харчових виробництв” (Полтава, 2004 р.), на IV міжнародній конференції “Проблемы промышленной теплотехники” (Київ, 2005 р.), на міжнародній науково-практичній конференції “Харчові технології ” (Одеса, 2005 та 2006 р.р.), на 71-ій та 73-ій наукових конференціях молодих вчених, аспірантів та студентів “Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті” (Київ, НУХТ, 2005 та 2007 р.р.), на четвертому семінарі “Информационные системы и технологии” (Одеса, 2006 р.), на XI Міжнародній науковій конференції “Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв” (Одеса, 2006 р.), на VI міжнародній науковій конференції аспірантів і студентів “Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів” (Донецьк, 2007 р.), на науковому семінарі “Математическое моделирование и информационные технологии” (Одеса, 2007 р.), на конференції молодих вчених, аспірантів і магістрів (Одеса, 2007 р.), на міжнародній науково-практичній конференції “Підвищення енергетичної ефективності харчових та хімічних виробництв” (Одеса, 2007 р.).

Зразки концентрованих виморожуванням продуктів та вимороженої води представлялися на V і VI Міжнародних спеціалізованих виставках-симпозіумах “Вино і виноробство” (Одеса, 2005 - 2007 р.р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 75 друкованих праць, з них 30 у наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України, 3 деклараційні патенти України на винаходи, тези 27 доповідей на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях.

Структура та об’єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, що включає 358 найменувань (36 стор.) та 15 додатків (126 стор.). Робота викладена на 353 сторінках основного тексту, містить 125 рисунків (75 стор.) та 45 таблиць (25 стор.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраного напрямку дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, відображено результати апробації, охарактеризовано особистий внесок здобувача, структуру і обсяг роботи.

У першому розділі “Теорія, техніка і перспективи використання процесів низькотемпературного розділення в харчових виробництвах” представлено аналітичний огляд літератури щодо історичних, технічних, технологічних і економічних аспектів використання виморожуючих установок у харчовій промисловості. На основі порівняльного аналізу різних способів розділення показана перспективність використання виморожуючих установок для концентрування рідких харчових продуктів, а також опріснення та очищення природних і промислових вод. Представлена класифікація процесів, що відбуваються у виморожуючих установках, і наведені фізичні основи та підходи до математичного моделювання таких процесів. Надана характеристика конструкцій та принципових схем сучасних установок для низькотемпературного розділення рідких систем харчових виробництв та відзначено, що на сьогоднішній день не розроблено показник, який би дозволяв оцінити ефективність того чи іншого способу або режиму виморожування як з економічної точки зору, так і з позиції якості кінцевого продукту. Показано, що для низькотемпературного розділення рідких систем харчових виробництв переважно використовуються установки, в яких теплота охолодження розчину і конструктивних елементів установки, а також теплота фазового перетворення розчину відводиться до холодоносія через стінку робочого елемента (кристалізатора), а кристалізація води здійснюється на рухомій границі розділу фаз. Відзначені переваги способу низькотемпературного розділення, при якому тверда фаза формується у вигляді блоку льоду на поверхні трубчатих кристалізаторів та представлений аналіз досліджень, присвячених вивченню процесів тепло- і масообміну в установках такого типу. В результаті цього аналізу встановлено, що існуючі математичні моделі виморожуючих установок зазначеного вище типу потребують вдосконалення у питаннях розрахунку: температури на фронті кристалізації для умов змінної температури розчину і змінної масової частки розчинних речовин у розчині; масової частки розчинних речовин у розчині в залежності від умов на фронті кристалізації; коефіцієнту кристалізації вимороженої фази. Крім того, потребують досліджень процеси тепло- і масовіддачі при опрісненні природних і промислових вод, соків і екстрактів, не вивчено вплив і не сформульовані механізми інтенсифікації процесів тепло- і масообміну при виморожуванні води із розчинів, не обґрунтовано режимні і конструктивні характеристики та економічна ефективність виморожуючих установок, не розроблена технічна документація на їх виробництво. Показано, що необхідним також є розширення відомостей про теплофізичні властивості розчинів при температурних режимах, характерних для виморожуючих установок, а також кріоскопічні криві рідких систем харчових виробництв.

На основі проведеного літературного огляду сформульовані задачі, які спрямовані на досягнення мети представленої дисертаційної роботи.

У другому розділі “Методологічні основи досліджень процесів низькотемпературного розділення рідких систем харчових виробництв” визначені напрямки досліджень та сформульовано загальну програму досліджень (рис. 1). Наведена порівняльна характеристика та обґрунтований вибір методів досліджень (кваліметрії, моделювання процесів тепло- і масовіддачі в розчині при виморожуванні з нього води, рівноважної температури при фазовому перетворенні “розчин → лід+розчин”, теплофізичних властивостей розчину і вимороженої фази, узагальнення результатів експериментальних досліджень, оцінки похибок досліджень та оптимізації), застосування яких необхідне для вирішення поставлених задач. Представлена характеристика рідких систем харчових виробництв, які використовувалися в дослідженнях процесів низькотемпературного розділення. Наведена характеристика розроблених експериментальних стендів та методик експериментальних досліджень.

У третьому розділі “Розробка науково-технічних основ процесів низькотемпературного розділення рідких систем харчових виробництв” на основі існуючих уявлень про функціональні зв’язки між режимними, конструктивними і технологічними умовами здійснення процесів виморожування із розчинів та техніко-економічними характеристиками процесів і якістю кінцевого продукту запропоновано структуру показника ефективності виморожуючої установки. Показник представлений у вигляді комплексного, а саме інтегрального, показника якості (J , кг/грн), який характеризує відношення приросту розчинних речовин вихідної сировини до грошових витрат, що йдуть на отримання кінцевого продукту з певною харчовою цінністю. Розраховується цей показник за рівнянням виду:

(1)

де - потужність виморожуючої установки за вихідною сировиною та кінцевим продуктом, кг/год; - масова частка розчинних речовин у вихідній сировині і кінцевому продукті, в частках одиниці; - коефіцієнт збереження харчової цінності продукту (визначається на основі літературних чи експериментальних

Рис.. Програма досліджень.

даних за зміною в продукті вмісту компонентів сировини, найбільш чутливих до технологічної обробки), в частках одиниці; - кількість робочих годин виморожуючої установки за рік, год; ціна вихідної сировини, грн/кг; - ціна виморожуючої установки, грн; - ціна електричної енергії, грн/(кВт·год); - електрична потужність виморожуючої установки, кВт; - коефіцієнт збільшення експлуатаційних витрат за рахунок відрахувань на амортизацію, ремонт та експлуатацію обладнання і відрахувань у соціальні фонди (визначається на основі економічних розрахунків).

Запропонований показник може використовуватися не тільки для оптимізації режимних і конструктивних характеристик виморожуючих установок, а й для порівняння ефективності технологій, які базуються на принципово різних способах розділення рідких систем харчових виробництв. В цьому випадку у рівнянні (1) замість буде стояти величина капітальних витрат на комплекс технологічного обладнання, необхідний для отримання концентрованих продуктів чи опріснених або доочищених природних і промислових вод (, грн), а замість комплексу - сумарні експлуатаційні витрати на виробництво зазначених вище видів продукції (, грн). При цьому величини та розраховуються з використанням відомих економічних методик і техніко-економічних показників існуючого чи розробленого обладнання.

Практичне використання рівняння (1) для оптимізації параметрів виморожуючої установки потребує наявності математичної моделі, яка б дозволяла визначати вплив температурного режиму роботи установки, конструктивних розмірів кристалізатора та ємності для розчину, теплофізичних властивостей розчину та вимороженої фази, технологічних параметрів розчину на продуктивність установки за вимороженою водою чи кінцевим продуктом з певним вмістом розчинних речовин, вартість установки та енергетичні витрати на процес низькотемпературного розділення. Оскільки існуючі математичні моделі не відображають в повній мірі ці зв'язки, тому були проведені аналітичні дослідження по вдосконаленню математичного опису процесів низькотемпературного розділення. В якості об'єкту дослідження використовувалися процеси виморожування води із розчинів в установках із трубчастими кристалізаторами, в яких тверда фаза формується на зовнішній поверхні кристалізатора у вигляді блоку льоду.

В розділі наведені фізична, балансова і кінетична модель процесів в такій установці. Характерною особливістю запропонованої моделі є умовне розділення твердої фази на ряд прошарків (внутрішні і фронтальний), які відрізняються теплофізичними властивостями через різну температуру прошарку і різний вміст розчинних речовин у міжкристалічній структурі. Крім того, особливістю фронтального прошарку є те, що в ньому кристалізація води відбувається одночасно по всьому об'єму і при температурі, що відповідає температурі фазового переходу розчину.

Такий підхід до математичного опису задачі дозволяє врахувати вплив зміни теплофізичних властивостей прошарків на значення температури на фронті кристалізації. Цьому також сприяє врахування впливу умов теплообміну на ділянці

“навколишнє середовище - ізоляція - стінка ємності - розчин” на кінетику процесів, які відбуваються на ділянці “розчин – прошарки твердої фази – стінка кристалізатора – холодоносій”.

Кінетична модель процесів тепло- і масообміну в елементах виморожуючої установки представлена у вигляді нестационарної тримірної задачі в циліндричних координатах та квазістационарної одновірної задачі з радіальним розподілом параметрів (рис. 2). В схемах та рівняннях, представлених на рис. 2 використані наступні позначення: Щ - розрахункова область; Г – границя між елементами моделі; r, φ, z - циліндричні координати; R – радіус елемента моделі, м; T – температура елемента моделі, К; елементи моделі : x та 1 – холодоносій; k та 2 – стінка кристалізатора; $i-1$, i та 3_{i-1} , 3_i – внутрішні прошарки вимороженої твердої фази; ϕ та 4 – фронтальний прошарок; p та 5 – розчин; e та 6 – стінка ємності для розчину; $и$ та 7 – стінка ізоляції; o та 8 – повітря навколишнього середовища; p – початковий; ϕ - тривалість процесу, с; c_p - питома теплоємність за постійного тиску, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³; λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м· К); $q_{кр}$ - інтенсивність тепловиділення в одиниці об'єму елементу моделі при фазовому перетворенні розчину, Вт/м³; x та x_R - швидкість переміщення елементарних частинок конвективного теплового потоку в циліндричних координатах та вздовж радіальної координати, м/с; a - коефіцієнт температуропровідності, м²/с; C – об'ємна концентрація компонентів розчину, кг/м³; D – коефіцієнт дифузії компонентів розчину, м/с².

Математична модель у вигляді нестационарної тримірної задачі в циліндричних координатах є загальною і за допомогою характерних для ряду елементів диференціальних рівнянь у часткових похідних з відповідними граничними умовами відображає процеси теплообміну в системі “навколишнє середовище – стінка ізоляції – стінка ємності – розчин – прошарки вимороженої твердої фази – стінка кристалізатора – холодоносій” та масообміну в системі “розчин – прошарки вимороженої твердої фази”. При всій повноті відображення процесів, що протікають у виморожуючій установці, нестационарна тримірна задача в циліндричних координатах на сьогоднішній день є складною для вирішення. Тому подальше математичне моделювання проведено при ряді припущень: температура й масова концентрація розчинних речовин у розчині є функцією тільки однієї координати R ; задача розглядається як квазістационарна, тобто для будь-якого фіксованого моменту часу розподіл температур і концентрацій за радіусом є стационарним, а теплофізичні властивості елементів моделі постійними; дифузія речовин у розчині, що перебуває в міжкристалічній структурі вимороженої фази, а також теплота, що виділяється при фазовому перетворенні цього розчину є незначними і ними можна знехтувати; масова концентрація розчинних речовин розчину на фронті кристалізації залежить від рівноважної температури при фазовому перетворенні “розчин→лід+розчин”.

З урахуванням прийнятих припущень, кінетична модель процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці представляється характерними для ряду елементів диференціальними рівняннями в звичайних диференціалах з відповідними граничними умовами. Ці рівняння описують конфігурацію стационарного поля

температур і концентрацій в елементах моделі в радіальному напрямку (рис. 2), а їх рішенням є рівняння, які відображають кількість теплоти та маси, що переноситься через відповідні елементи моделі. Загальний тепловий потік у виморожуючій установці та

???. 2. ????????? ??????.

маса твердої фази, що утворюється в процесі її роботи, визначаються за рівняннями виду:

, (2)

де K_9 – лінійний коефіцієнт теплопередачі від навколишнього середовища до ядра розчину, Вт/(м·К); H – робоча висота елемента моделі, м; α – середній (за висотою і часом) коефіцієнт тепловіддачі від розчину до фронту кристалізації, Вт/(м²·К); λ – питома теплота льодоутворення, Дж/кг; γ – частка води у розчині, в частках одиниці; $\gamma_{\text{вм}}$ – частка вимороженої води, в частках одиниці; $T_{\text{фр}}$ – середньо масова температура фронтального прошарку, К.; K_0 – лінійний коефіцієнт теплопередачі від внутрішньої стінки фронтального прошарку до холодоносія, Вт/(м·К); $m_{\text{вф}}$ – маса твердої фази, що утворюється в результаті фазового перетворення розчину, кг; β – середній (за висотою і часом) коефіцієнт масовіддачі від розчину, м/с; C – об'ємна концентрація розчинних речовин в ядрі розчину, кг/м³; $C_{\text{фр}}$ – об'ємна концентрація розчинних речовин біля фронту кристалізації, кг/м³.

Для практичного використання рівнянь (2) необхідно виконати аналітичні та експериментальні дослідження, спрямовані на отримання залежностей для розрахунку

У третьому розділі також представлені принципові схеми використання виморожуючих установок у харчових виробництвах та наведена їх характеристика (рис. 3).

Важливим результатом розділу є принципові схеми виморожуючих установок, в яких процеси тепло- і масообміну в розчині та вимороженій фазі інтенсифікують ся внаслідок: механічного перемішування розчину (рис. 4 а); акустичних коливань у розчині, що створюються за допомогою п'єзо випромінювачів (рис. 4 б); механічних коливань, які створюються пульсуючою в розчині мембраною (рис. 4 в); зміни конструкції та розташування кристалізатора (перехід від трубчатого вертикального кристалізатора до горизонтальної пластини, рис. 4 г); механічного видалення розчину, що знаходиться в міжкристалічному просторі вимороженої фази (рис. 4 д).

Вважається, що механізм інтенсифікації процесів переносу в конструкціях виморожуючих установок (рис. 4 а – 4 в) полягає у тому, що механічне перемішування, а також акустичні та механічні коливання сприяють збільшенню швидкості руху елементарних частинок розчину та діють на в'язкий прошарок розчину біля фронту кристалізації, розмиваючи його і зменшуючи в ньому концентрацію розчинних речовин. В результаті такого впливу розчин охолоджується швидше і до більш низької температури, а тверда фаза формується за короткий проміжок часу і з меншим вмістом розчинних речовин.

Рис. 3. Принципові схеми застосування виморожуючих установок в харчових виробництвах.

Аналогічних результатів можна досягнути при організації процесу виморожування на нижній поверхні горизонтального пластинчатого кристалізатора

(рис. 4 г). Але при цьому збільшенню швидкості конвективних потоків в розчині в більшій мірі будуть сприяти сили гравітації, напрямок дії яких співпадає з напрямком руху потоку розчинних речовин в розчині (із в'язкого прошарку розчину, що межує з фронтом кристалізації, в основну масу розчину) та градієнтом температур між розчином і фронтом кристалізації.

Механізм інтенсифікації процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці при механічному видаленні розчину із міжкристалічної структури вимороженої фази в процесі її формування (рис. 4 д) полягає у зниженні температури на фронті кристалізації внаслідок підвищення коефіцієнту теплопровідності вимороженої фази, що в свою чергу обумовлено зменшенням кількості і концентрації розчину, який знаходиться у цій фазі. В результаті такої організації процесу охолодження розчину та зростання твердої фази відбувається швидше, кількість концентрованого розчину та масова частка розчинних в ньому речовин зростають, а тривалість процесів кристалізації та сепарування скорочується. Для підтвердження сформованих механізмів інтенсифікації процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці необхідним є виконання комплексу експериментальних досліджень.

У четвертому розділі “Математичне моделювання температури на фронті кристалізації, процесів тепло-і масовіддачі в розчині, теплофізичних властивостей

Рис. 4. Принципові схеми апаратів з інтенсифікацією процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці: а) з мішалкою; б) з п'єзо випромінювачем; в) з пульсуючою мембраною; г) з горизонтальним кристалізатором; д) з механічним видаленням розчину із міжкристалічної структури вимороженої фази; 1 - трубчастий кристалізатор; 2 – виморожена тверда фаза; 3 – розчин; 4 – ємність для розчину; 5 – мішалка; 6 – п'єзо випромінювачі; 7 - пластинчастий кристалізатор; 8 - пульсуюча мембрана; 9 – відбірники розчину із міжкристалічної структури вимороженої фази.

розчину і вимороженої фази, а також умов рівноваги при фазовому перетворенні “розчин \rightarrow лід+розчин”” на основі рівнянь, що відображають теплові потоки в елементах виморожуючої установки та за допомогою прикладного математичного пакету *Mathcad* отримано рівняння для розрахунку температури на фронті кристалізації:

(3)

Отримані також рівняння для розрахунку температур на всіх інших поверхнях елементів моделі.

Показано, що для визначення коефіцієнтів i в умовах природної конвекції можна використовувати рівняння традиційної структури, а саме для розрахунку тепловіддачі – , а для розрахунку масовіддачі – . 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 при кристалізації з нього води в умовах конкретної виморожуючої установки.

Представлені результати моделювання тепло- і масовіддачі в розчинів при виморожуванні з нього води в умовах механічного перемішування розчину. Для цих умов вид рівнянь для розрахунку i 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_p , м); діаметр мішалки (d_m , м); частота обертів мішалки ($n_{\text{міш}}$, с^{-1}); c_p ; m_p ; l . А при формуванні рівняння для розрахунку масовіддачі в розчині в якості незалежних змінних були прийняті наступні параметри: δ_p ; d_m ; $n_{\text{міш}}$; c_p ; m_p ; коефіцієнт дифузії компоненту, який переважає у розчині (D , $\text{м}^2/\text{с}$). Після розв'язання системи рівнянь, складеної для основних одиниць, і пошуку комбінацій одержано структури рівнянь в узагальнених змінних для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі - та масовіддачі -. В наведених вище рівняннях C , A – константи, а d , f , a , c , h , b - показники степеню, що визначаються в результаті математичної обробки експериментальних даних по кінетичним дослідженням; K – безрозмірний параметр, який розраховується наступним чином: $K = \delta_p / d_m$. 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 ($t_0 = (t_p + t_{\text{тп}}) / 2$), масова частка розчинних речовин () і конструктивний розмір ($\delta_p = (d_e - d_{\text{вф}}) / 2$). В цих залежностях: t_0 – визначаюча температура, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{тп}}$ – температура на теплопередаючій поверхні, $^{\circ}\text{C}$; t_p – температура розчину, $^{\circ}\text{C}$; w_0 – визначаюча масова частка розчинних речовин у розчині, %; – масова частка розчинних речовин біля фронту кристалізації, %; w_p – масова частка розчинних речовин в ядрі розчину, %; d_e – внутрішній діаметр ємності для розчину, м; $d_{\text{вф}}$ – зовнішній діаметр вимороженої фази, м.

З використанням рівнянь, що відображають теплові потоки в елементах виморожуючої установки, отримано рівняння для розрахунку коефіцієнту теплопровідності вимороженої фази. В результаті математичної обробки літературних даних отримані рівняння для розрахунку теплофізичних властивостей рідких систем харчових виробництв.

При моделюванні рівноважних температур при фазовому перетворенні “розчин \rightarrow лід+розчин” харчовий розчин розглядається як складна гомогенна термодинамічна система, в якій зв'язок між термодинамічними властивостями визначається рівняннями, що впливають із першого та другого законів термодинаміки. Охолодження розчину призводить до порушення рівноваги в системі, зміни термодинамічних параметрів системи (зокрема супроводжується зменшенням енергії Гіббса) та фазового перетворення розчину. При цьому умови фазової рівноваги визначаються рівністю молярних хімічних потенціалів компонентів розчину в рідкій і твердій фазах або рівністю активності води (термодинамічна функція, яка використовується на практиці для визначення молярних хімічних потенціалів компонентів водних розчинів) в рідкій () і твердій фазах (). Обґрунтовано вибір рівняння для розрахунку активності води у розчині. Показано, що рівняння Плотнікова-Філаткіна (для розрахунку активності води у твердій фазі чистої води) можна використовувати для розрахунку активності води у

твердій фазі розчину, якщо його доповнити додатковими коефіцієнтами, які будуть враховувати вплив розчинних речовин на питому молярну теплоємність переохолодженого розчину. В цьому випадку рівняння матиме наступний вигляд:

(4)

де ΔT - зниження температури замерзання розчину по відношенню до температури замерзання чистої води, К; T – температура замерзання води при рівноважних умовах, К; x - загальна молярна частка розчинних речовин у розчині, в частках одиниці; L - питома теплота фазового перетворення води, Дж/моль; R – молярна газова постійна, Дж/(моль·К); ΔC_p - алгебраїчна різниця індивідуальних коефіцієнтів рівнянь, що описують зміну питомої молярної теплоємності переохолодженої чистої води та льоду; A_1, B_1, C_1, C_2 – коефіцієнти, що враховують вплив розчинних речовин розчину на зміну питомої молярної теплоємності переохолодженого розчину. Для визначення значень коефіцієнтів A_1, B_1, C_1, C_2 необхідно виконати експериментальні кріоскопічні дослідження.

У п'ятому розділі “Експериментальні кріоскопічні дослідження, а також дослідження теплофізичних властивостей розчинів і вимороженої фази” представлені результати визначення рівноважних температур ряду розчинів при фазовому перетворенні “розчин→лід+розчин”. Також наведені результати досліджень густини розчинів та коефіцієнту теплопровідності вимороженої з них твердої фази.

Кріоскопічні дослідження проводилися на: модельних розчинах органічних речовин, які є характерними для соків і екстрактів (водні розчини цукрів і кислот); соках із шовковиці, винограду і апельсина; водному екстракті вишневих вичавок; морській воді Чорного моря; промислових стоках виноробного підприємства, що утворюються після миття тари та обладнання. Масова частка розчинних речовин в розчинах змінювалася в наступних діапазонах: від 1 до 50 % - в модельних розчинах цукрів; від 1 до 10 % - в модельних розчинах кислот; від 7 до 32 % - в соках і екстракті; від 1 до 5 % - для морської води Чорного моря; від 0,1 до 1 % - для промислових стоків виноробного підприємства. Результати кріоскопічних досліджень представлені у вигляді кривих охолодження та кріоскопічних кривих зазначених вище розчинів (рис. 5 а – 5 г). На рис. 5 а і рис. 5 б в дужках наведено співвідношення між компонентами розчинних речовин у розчині.

Математична обробка результатів кріоскопічних досліджень проводилася згідно розробленої моделі з використанням прикладного математичного пакету *Mathcad*. В результаті обробки отриманні значення коефіцієнтів $A^1 = -1,8 \cdot 10^{-3}$; $B^1 = -0,014$; $C^1 = -5,2 \cdot 10^{-3}$; $C^2 = -0,049$. Вони є справедливими для таких продуктів, як соки і екстракти.

Результати експериментальних досліджень густини соків (апельсиновий, чорносмородиновий, шовковиці), а також промислових стоків виноробного підприємства представлені у вигляді графічних залежностей. Деякі з цих залежностей наведені

Рис. 5. Експериментальні кріоскопічні криві: а) трикомпонентні модельні розчини, б) чотирьохкомпонентні модельні розчини, в) двохкомпонентні модельні розчини, г) соки.

на рис.6. В результаті математичної обробки експериментальних даних по густині вище названих розчинів отримані регресійні рівняння для розрахунку значення густини розчину в залежності від масової частки розчинних у ньому речовин та його температури. Рівняння наведені в п'ятому розділі.

Результати експериментального визначення коефіцієнту теплопровідності вимороженої фази ($\lambda_{\text{вф}}$, Вт/(м·К)) представлені на рис. 7. Дослідження проводилися на водних розчинах сахарози та абрикосовому соці. Експериментальні дані наведені в порівнянні із значеннями коефіцієнтів теплопровідності вимороженої фази, розрахованими за рівнянням адитивності. В результаті математичної обробки експериментальних та літературних даних отримане рівняння (наведено на рис. 7) для визначення в залежності від масової частки розчинних речовин у вимороженій фазі (, %).

У шостому розділі “Кінетика процесів виморожування води із розчинів в умовах природної конвекції та при інтенсифікації процесів тепло- і масопереносу” представлені результати експериментальних кінетичних досліджень та їх узагальнення.

Кінетика процесів тепло- і масопереносу при виморожуванні води із розчинів в умовах природної конвекції досліджувалась на трьох експериментальних стендах з вертикальними трубчастими кристалізаторами та циліндричними ємностями для розчину. Стенди відрізнялися системами охолодження, а також конструктивними розмірами кристалізаторів і ємностей для розчину. Під час експериментальних досліджень вивчався вплив початкової температури розчину (t_p' , °C), початкового об'єму розчину (V_p' , мі), початкової масової частки розчинних речовин у розчині (, %), діаметрів кристалізатора ($d_{\text{кр}}$, мм) і ємності для розчину (d_e , мм), температурного режиму роботи установки ($t_{\text{хл}}$, °C) на зміну поточних значень: масової частки розчинних речовин у розчині (, %) та у вимороженій фазі (, %); масової частки

Рис. 6. Залежність густини соків від масової частки розчинних речовин у розчині.

Рис. 7. Залежність коефіцієнту теплопровідності вимороженої фази від масової частки розчинних в ній речовин.

розчинних речовин біля фронту кристалізації (, %); температур у розчині (t_p , °C) і вимороженій фазі ($t_{\text{вф}}$, °C); температури на фронті кристалізації ($t_{\text{фк}}$, °C); об'єму розчину (V_p , мі); діаметру блоку льоду ($d_{\text{вф}}$, мм), тривалість процесу (ϕ , с). При виконанні кінетичних досліджень використовувалися модельні розчини (водні розчини сахарози і хлористого натрію), природні та промислові води (вода водопровідна, морська вода Чорного моря, промислові стоки виноробного підприємства), соки (апельсиновий, чорносмородиновий, шовковиці, виноградний) та водні екстракти на основі виноградних і вишневих вичавок, а також на основі пряно-ароматичної сировини. Діапазони зміни режимних параметрів процесу

виморожування наведені в табл.1.

Результати експериментальних кінетичних досліджень представлені у вигляді графічних залежностей, що відображають зміну за часом параметрів розчину і вимороженої фази, а також графічних залежностей, що відображають розподіл темпе-

Таблиця 1

Діапазони зміни режимних параметрів процесу

Розчин	Параметри			
	%	$t_p', ^\circ\text{C}$	$V_p' \cdot 10^3, \text{м}$	$t_{\text{хл.}}, ^\circ\text{C}$
Водний розчин сахарози	5 - 40	2...20	0,25...0,5	-10...-12,5
Водний розчин хлористого натрію	0,002 - 0,25	5,5...21,5	0,25...1,5	-2,5...-7
Соки, екстракти	2 - 35	2...20	0,25...3	-5...-20
Природні та промислові води	0,002 - 1,25	4,7...21,5	0,2...1,5	-2,5...-10

ратур і концентрацій у виморожуючій установці в радіальному напрямку (рис. 8).

Аналіз результатів кінетичних досліджень, отриманих при вказаних вище умовах, а також кінетичних залежностей, представлених в літературі (для подібних режимів, але інших за теплофізичними властивостями розчинів (молочна сироватка, вина) дозволив сформулювати наступні загальні закономірності процесів виморожування:

- із підвищенням при $t_{\text{хл.}}, d_{\text{кр.}}, V_p', t_p' = \text{const}$ виморожування води із розчину і його охолодження відбувається повільніше, ступінь концентрування розчину () зменшується, а $\psi_{\text{вф}}$ і ϕ збільшується;

- із зниженням $t_{\text{хл.}}$ при $d_{\text{кр.}}, V_p', t_p' = \text{const}$ інтенсивність виморожування води із розчину та інтенсивність його охолодження зростає, ϕ скорочується, зменшується, а збільшується;

- із збільшенням $d_{\text{кр.}}$ при $V_p', t_{\text{хл.}}, t_p' = \text{const}$ збільшується ϕ , але якість процесу розділення розчинів зростає;

- найбільш інтенсивне охолодження розчину відбувається протягом перших (30 - 60) хв процесу. Із збільшенням товщини блоку льоду температура на фронті кристалізації зростає, різниця температур (ΔT) між температурою на фронті кристалізації і температурою в ядрі розчину зменшується, а інтенсивність охолодження розчину знижується (рис. 8 а);

- температурне поле в блоці льоду і розчині нерівномірне (рис. 8 б);

- протягом періоду процесу, коли ΔT знаходиться в межах від 5 до 30 $^\circ\text{C}$, зміна відбувається тільки в прошарку розчину, що межує з фронтом кристалізації. При цьому значення може перевищувати значення в 2,5-3 рази (для соків, екстрактів) чи 1,6-1,7 рази (для природних і промислових вод). Протягом періоду процесу, коли ΔT знаходиться в межах від 2 до 5 $^\circ\text{C}$ змінюється по всьому об'єму розчину, і вже значення незначно перевищує значення (рис. 8 в);

- ріст вимороженої фази супроводжується захопленням розчину в міжкристалічну структуру. В процесі охолодження (після кристалізації) вимороженої фази масова частка розчинних речовин в цьому розчині змінюється внаслідок подальшого виморожування з нього води. При цьому у вимороженій фазі

на відстані до 15 мм від поверхні кристалізатора масова частка розчинних речовин у розчині, що знаходиться у міжкристалічній структурі в 2-4 рази перевищує значення (рис. 8 г).

В результаті узагальнення досліджень по розподілу концентрацій у виморожуючій установці (рис. 8. в) отримане рівняння для розрахунку поточної масової частки розчинних речовин у розчині в залежності від різниці температур між температурою на фронті кристалізації та температурою в ядрі розчину:

Рис. 8. Радіальний розподіл температур і концентрацій у виморожуючій установці.

Таблиця 2

, де (5)

Дослідження впливу механічного перемішування розчину на кінетику процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці проводилися на водному розчині хлористого натрію при $t_{\text{хл.}} = -5 \text{ C}$, $V_p' = 0,00025 \text{ м}^3$, $\phi = (0,1 - 0,25) \%$ та частоті обертів мішалки $n_{\text{міш}} = (100 - 660) \text{ об/хв}$. В дослідженнях визначався вплив $n_{\text{міш}}$ на зміну поточних значень параметрів розчину та вимороженої фази. Аналіз отриманих кінетичних залежностей дозволив сформулювати наступні закономірності процесу:

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

- при подальшому збільшенні $n_{\text{міш}}$ інтенсивність процесу теплообміну зростає, а масообміну зменшується.

При дослідженні кінетики процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці з п'єзо випромінювачем вивчався вплив частоти акустичних коливань (f_a , кГц) і розташування п'єзо випромінювача відносно фронту кристалізації на зміну параметрів розчину та вимороженої фази. Дослідження проводилися при частотах акустичних коливань від 4,5 до 100 кГц і при розташуванні п'єзо випромінювача горизонтально на поверхні розчину та дні ємності для розчину (при цьому акустичні хвилі спрямовувалися вздовж фронту кристалізації), а також вертикально в розчині (при цьому акустичні хвилі спрямовувалися перпендикулярно до фронту кристалізації). Для дослідження процесів переносу в зазначених вище умовах використовувалися водні розчини сахарози, виноградний сік і водний екстракт виноградних вичавок. Результати експериментальних досліджень наведені на рис. 9 а – 9 в. На рис. 9 б та 9 в лініям 1-5 відповідають наступні умови: 1 – п'єзо випромінювач розташований горизонтально на дні ємності для розчину; 2 – п'єзо випромінювач розташований горизонтально на поверхні розчину; 3- п'єзо випромінювач розташований вертикально в розчині; 4, 5 – без випромінювача. Графічні залежності, представлені на рис. 9 б та 9 в, отримані при $f_a = 22 \text{ кГц}$. Аналіз отриманих результатів дозволив сформулювати наступні характерні закономірності процесу:

- під впливом акустичних коливань в діапазоні частот від 15 до 50 кГц інтенсивність росту вимороженої фази збільшується на (15 – 27) % в порівнянні з

процесом виморожування без акустичних коливань. При підвищенні f_a до 100 кГц зростає крихкість вимороженої фази і процес виморожування не відбувається (рис. 9 а);

- перпендикулярно спрямовані до фронту кристалізації акустичні хвилі найбільшим чином впливають на прошарок розчину біля фронту кристалізації. При цьому $w_{фк}$ зменшується, а w_p збільшується на 14 % в порівнянні з процесом без акустичних коливань (рис. 9 б, 9 в). Акустичні хвилі, спрямовані вздовж фронту кристалізації, більшим чином інтенсифікують процес кристалізації води. При цьому у виморожену фазу захоплюється більша кількість розчину і w_p змінюється не значно (рис. 9 б, 9в).

Наведені результати експериментальних досліджень впливу механічних коливань на кінетику процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці. Механічні коливання в розчині створювалися за допомогою пульсуючої мембрани, що представляла собою перфоровану пластину з поверхневою пористістю 40 %. Мембрана розміщувалася паралельно поверхні кристалізації. В дослідженнях вивчався вплив частоти коливань мембрани (f_m , Гц) на зміну параметрів розчину та вимороженої фази. Для дослідження процесів переносу в таких умовах використовувалися водні розчини сахарози. Результати досліджень представлені у вигляді графічних залежностей (деякі з них наведені на рис. 9 г). Залежності на рис. 9 г отримані при наступних умовах: 1- $f_m = 0,0033$ Гц, $\epsilon' = 12$ %; 3 - $f_m = 0,0833$ Гц, $\epsilon' = 26$ %; 4 - $f_m = 0,2167$ Гц, $w_p' = 26$ %; 7 - без коливань, $\epsilon' = 12$ %; 9 - без коливань, $\epsilon' = 26$ %. Дослідження проводились при температурному режимі установки мінус 17 °С. Аналіз отриманих результатів дозволив сформулювати такі закономірності процесу:

- з підвищенням f_m товщина вимороженої фази зростає, а розчин охолоджується інтенсивніше і до більш низької температури (рис. 9 г);

- із зростанням f_m для ефективного розділення розчину слід використовувати механічні коливання із більшою частотою.

Наведені результати експериментальних досліджень процесів тепло- і масообміну при виморожуванні води із розчину на нижній поверхні горизонтального пластинчастого кристалізатору. Дослідження виконувалися на дистильованій воді і водних екстрактах гвоздики. В розділі наведені результати досліджень (деякі з них представлені на рис. 9 д), аналіз яких дозволив сформулювати наступні закономірності:

- кінцева масова частка розчинних речовин у продукті (%), та товщина вимороженої фази ($D_{вф}$, мм), отриманні при виморожуванні води із розчинів на нижній поверхні горизонтального пластинчастого кристалізатора, в 1,2 та 1,36 разів перевищує та $D_{вф}$ в установці із вертикальним трубчастим кристалізатором (рис. 9 д);

- при виморожуванні води із розчину на нижній поверхні горизонтального кристалізатора розчин охолоджується інтенсивніше і до більш низької температури.

Вивчався впливу механічного відбору розчину із вимороженої фази в процесі її росту на кінетику процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці. Для дослідження процесів переносу в зазначених вище умовах використовувалися сік чорної смородини, морська вода і промислові стоки виноробного заводу. Відбір

розчину із пористої структури вимороженої фази здійснювався на відстані 4, 10 і 16 мм від поверхні кристалізатора протягом проміжку часу від моменту формування вимороженої фази необхідної товщини до моменту завершення процесу виморожування. Результати експериментальних досліджень представлені у вигляді графічних залежностей і деякі з них наведені на рис. 9 ж. Аналіз отриманих результатів дозволив сформулювати наступні закономірності процесу:

- масова частка розчинних речовин у розчині, що відбирається із міжкристалічної структури вимороженої фази в 1,7 раз вища ніж у кінцевому концентрованому продукті;
- застосування механічного відбору розчину із міжкристалічної структури твердої фази в процесі виморожування дозволяє підвищити вихід концентрованого продукту на 13 – 15 %;
- відбір розчину із міжкристалічної структури твердої фази в процесі виморожування дозволяє скоротити тривалість процесу гравітаційного сепарування в 2 рази (рис. 9 ж).

Результати узагальнення експериментальних досліджень по тепло- і масовіддачі в рідких системах харчових виробництв при виморожуванні з них води на поверхні вертикальних трубчатих кристалізаторів в умовах природної конвекції в розчині та при його механічному перемішування представлені у шостому розділі у вигляді критеріальних рівнянь. Для соків і екстрактів критеріальні рівняння наведені в табл. 3.

Рис. 9. Кінетика процесів тепло- і масообміну у виморожуючій установці в умовах їх інтенсифікації: а), б), в) під впливом акустичних коливань, г) під впливом механічних коливань д) на горизонтальному пластинчастому кристалізаторі, ж) з відбором розчину із твердої фази.

Таблиця 3

Результати узагальнення експериментальних кінетичних досліджень

Рівняння	Діапазон зміни чисел подібності, похибка рівняння
Виморожування в умовах природної конвекції у розчині	
тепловіддача:	$20 \cdot 10^5 < \dots < 20 \cdot 10^6$; $1 < Nu < 20$, похибка рівняння – 14 %
масовіддача:	$70 \cdot 10^5 < \dots < 40 \cdot 10^{10}$; $50 \cdot 10^4 < \dots < 110$, похибка рівняння – 10 %

У цьому розділі “Інженерні методи розрахунку виморожуючих установок. Апробація та практична реалізація результатів роботи” наведено загальну структуру розрахунку виморожуючих установок з вертикальними трубчастими кристалізаторами, яка включає етапи розрахунку рівноважних температур розчинів при фазовому перетворенні “розчин→лід+розчин”, кінетики процесів тепло- і масообміну, конструктивних, техніко-економічних та оптимальних параметрів виморожуючої установки. Кожний етап розрахунку представлений у вигляді методик, алгоритмів та комп’ютерних програм, які базуються на результатах аналітичних і експериментальних досліджень, представлених в розділах 3-6.

Так, з використанням коефіцієнтів A_1 , B_1 , C_1 та C_2 , а також літературних відомостей про хімічний склад ряду фруктів, ягід та цитрусових, за розробленою методикою розраховано 15 кріоскопічних кривих соків, які можуть бути отримані на основі вище зазначеної сировини.

Розрахована кінетика процесів тепло- і масопереносу при виморожуванні води із рідких систем харчових виробництв, а також конструктивні параметри основних елементів виморожуючої установки. З використанням цих даних сформований параметричний ряд, який, наприклад, у випадку коли $d_{кр}=48,342$, має вигляд, представлений у табл. 4.

Оптимізація режимних та конструктивних параметрів виморожуючої установки проводилась за допомогою інструментарію *Optimization Toolbox* в системі *Matlab*. При цьому використовувався метод послідовного квадратичного програмування (*SQP*), а пошук максимуму функції здійснювався за допомогою стандартної функції *fmincon*, яка реалізує квазі-ньютонівський метод лінійного пошуку. Оптимізація конструктивних і режимних параметрів установки здійснювалася за комплексним показником якості виморожуючої установки (рівняння 1). У якості параметрів оптимізації були прийняті: тривалість процесу, температурний режим роботи установки та геометричні розміри кристалізатора, а саме його висота.

На першому етапі оптимізації визначалися оптимальні значення висоти кристалізатора (рис.10). На рис.10 позначенням h і T відповідають висота кристалізатора і температурний режим роботи установки. Встановлено, що максимум функції відповідає найбільшим значенням висот із параметричного ряду для кожної потужності виморожуючої установки.

На другому етапі оптимізації при обґрунтованій на попередньому етапі висоті кристалізатора визначалися оптимальні значення тривалості процесу та температурного режиму виморожуючої установки для заданих значень масових

часток розчинних речовин у розчині (рис. 11 а та 11 б. На рис.11 позначенню С відповідає значення масової частки розчинних речовин у розчині). В процесі оптимізації масова частка розчинних речовин у розчині змінювалася від 8 до 40 %, температурний режим роботи установки – від мінус 10 °С до мінус 20 °С, а тривалість процесу – від 3600 с до 14400 с. Узагальнення результатів оптимізації режимних параметрів роботи виморожуючої установки при розділенні соків представлено на рис.12.

З урахуванням результатів оптимізації розраховані техніко-економічні параметри виморожуючих установок з потужністю за вихідною сировиною від 200 до 10000 кг за цикл (табл. 5).

Результати виконаних досліджень також використані при розробці технічного завдання на виробництво блочних виморожувачів БЛС-П і нормативної документації на виробництво дослідної партії “Напою алкогольного “Глінтвейн” з кріоекстрактами пряно-ароматичної сировини” (ТУ У 15.9-26303655-30:2005).

Виконаним порівняльним техніко-економічним аналізом технологій, що використовують різні способи розділення рідких систем харчових виробництв, а також порівняльним аналізом фізико-хімічних показників якості продукції, отриманої за допомогою різних технологій, підтверджено доцільність застосування виморожуючих установок на вітчизняних харчових виробництвах. Крім того, ефективність застосування виморожуючих установок для розділення рідких систем харчових виробництв підтверджено результатами досліджень фізико-хімічних, мікробіологічних

та санітарно-гігієнічних показників зразків розчинів до та після виморожування.

Зразки продукції, отриманої в результаті низькотемпературного розділення та виморожуючі установки були апробовані у виробничих умовах на ТОВ “Ланжерон і К” (Одеська обл., Роздільнянський р-н), базі відпочинку “Парус” (м. Білгород-Дністровський, Одеська обл.), ТОВ агрофірмі “Еврика” (м. Одеса), АТ Миколаївському пивзаводі “Янтар” (м. Миколаїв). Розраховані можливі економічні ефекти від використання виморожуючих установок в умовах вище названих підприємств. Так, економічний ефект від використання виморожуючої установки на базі відпочинку “Парус” для опріснення питної води протягом курортного сезону складатиме - 9000 грн. Економічний ефект від впровадження виморожуючої установки в схему водопідготовки на підприємстві АТ Миколаївський пивзавод “Янтар” становитиме 169 тис. грн. Економічна ефективність від використання концентрованих виморожуванням екстрактів пряно-ароматичної сировини при виробництві “Глінтвейну” на підприємстві “Ланжерон і К” становитиме від 5000 до 10000 грн. за зимовий сезон в залежності від закупівельної вартості вина. Соціальний ефект практичного впро-

Таблиця 5

Техніко-економічні характеристики виморожуючих установок

Характеристики	БЛС- П 0.2	БЛС- П 0.5	БЛС- П 1	БЛС- П 2	БЛС- П 5	БЛС- П 10
Потужність за вихідною сировиною,	200	500	1000	2000	5000	10000

кг/цикл						
Кількість кристалізаторів, шт	7	19	19	37	91	169
Площа поверхні одного кристалізатора, м ²	0,15	0,14	0,28	0,28	0,28	0,31
Внутрішній діаметр ємності для розчину, м	0,45	0,76	0,76	1,06	1,66	2,27
Питома продуктивність за вимороженою водою, кг/м ²	64–90					
Холодопродуктивність, кВт	2,73	6,65	13,3	26,37	65,58	130,91
Маса установки (без компресорно-конденсаторного агрегату), кг	91,7	153,1	306,1	483,3	917,1	1563,7
Споживана потужність, кВт	1,03	2,02	3,8	6,5	20	40
Вартість установки, тис. грн	45,2	58,2	117	199	462	793

вадження результатів роботи визначається розширенням асортименту якісних продуктів та питної води.

Висновки

На основі теоретичних узагальнень, аналітичних і експериментальних досліджень розроблені науково-технічні основи процесів низькотемпературного розділення рідких систем харчових виробництв, які дозволяють підвищувати ефективність роботи виморожуючих установок та сприяють розвитку в Україні їх виробництва і використанню в галузях харчової промисловості.

Розроблено структуру комплексного показника якості виморожуючих установок.

Визначені принципові напрямки та схеми застосування виморожуючих установок в харчових виробництвах. Показано, що такими напрямками є концентрування і фракціювання харчових розчинів, а також опріснення та доочистка природних і промислових вод.

Вдосконалено структуру рівняння для розрахунку рівноважної температури розчину при фазовому перетворенні “розчин→лід + розчин”. Визначенні значення коефіцієнтів, які враховують вплив розчинних речовин на питому молярну теплоємність переохолодженого розчину: $A_1 = -1,8 \cdot 10^{-3}$; $B_1 = -0,014$; $C_1 = -5,2 \cdot 10^{-3}$; $C_2 = -0,049$. З використанням отриманого рівняння і коефіцієнтів A_1 , B_1 , C_1 , C_2 , а також відомостей про хімічний склад фруктових та цитрусових сировин розраховано 15 кріоскопічних кривих соків, які можуть бути отримані з вище вказаної сировини.

Вдосконалено математичну модель процесів тепло- і масопереносу у виморожуючій установці з формуванням твердої фази у вигляді блоку льоду. При цьому отримані рівняння для розрахунку:

- поточної температури на фронті кристалізації, яке враховує зміну в процесі теплофізичних властивостей розчину і вимороженої фази, а також умов теплообміну із навколишнім середовищем;
- поточної масової частки розчинних речовин в ядрі розчину в залежності від різниці температур між температурою на фронті кристалізації та температурою в ядрі розчину;
- коефіцієнту теплопровідності вимороженої фази в залежності від масової частки розчинних в ній речовин.

6. Отримані графічні залежності та рівняння для розрахунку густини чорносмородинового, апельсинового і шовковичного соків, а також промислових стоків виноробного підприємства

7. Встановлено нові характерні закономірності процесу виморожування води із розчину в умовах природної конвекції:

- протягом періоду процесу виморожування, коли різниця температур між температурою на фронті кристалізації і температурою в розчині знаходиться в межах від 5 до 30 °С, зміна масової частки розчинних речовин відбувається тільки в прошарку розчину, що межує з фронтом кристалізації. При цьому значення масової частки розчинних речовин у вимороженій фазі перевищує значення масової частки розчинних речовин у розчині в 2,5-3 рази (для соків, екстрактів) та 1,6-1,7 рази (для природних і промислових вод);

- протягом періоду процесу, коли різниця температур між температурою на фронті кристалізації і температурою в розчині знаходиться в межах від 2 до 5 °С, зміна масової частки розчинних речовин відбувається по всьому об'єму розчину і її значення незначно відрізняється від значення масової частки розчинних речовин у розчині біля фронту кристалізації;

- в процесі охолодження (після кристалізації) вимороженої фази масова частка розчинних речовин у розчині, що знаходиться у міжкристалічній структурі змінюється внаслідок подальшого виморожування з нього води. При цьому у вимороженій фазі на відстані до 15 мм від поверхні кристалізатора її значення в 2-4 рази перевищує значення масової частки розчинних речовин у основній масі розчину.

8. Показано, що інтенсифікація процесів переносу теплоти і маси у виморожуючій установці здійснюється під впливом акустичних та механічних коливань, механічного перемішування розчину, при виморожуванні води на нижній поверхні горизонтального пластинчастого кристалізатора та при механічному видаленні розчину із міжкристалічної структури вимороженої фази. Встановлені наступні закономірності процесів тепло- і масообміну в умовах їх інтенсифікації:

- при механічному перемішуванні розчину в діапазоні $100 < n_{\text{міш}} < 660$ об/хв ступінь концентрування розчину зростає в 1,4 рази, масова частка розчинних речовин у вимороженій фазі зменшується в 1,5 рази, а інтенсивність виморожування води із розчину підвищується в 1,4 рази. При подальшому збільшенні $n_{\text{міш}}$ інтенсивність процесу теплообміну зростає, а масообміну зменшується;

- найбільший вплив на процеси тепло- і масообміну у виморожуючій установці чинять акустичні коливання з частотою від 15 до 50 кГц. В цих умовах інтенсивність росту вимороженої фази збільшується на (15 – 27) % в порівнянні з процесом виморожування без акустичних коливань. При підвищенні f_a до 100 кГц зростає крихкість вимороженої фази і процес виморожування не відбувається;

- перпендикулярно спрямовані до фронту кристалізації акустичні хвилі найбільшим чином впливають на прошарок розчину біля фронту кристалізації. При цьому масова частка розчинних речовин у розчині біля фронту кристалізації зменшується на 15 - 17 %, а масова частка розчинних речовин у ядрі розчину збільшується на 14-15 % в порівнянні з процесом без акустичних коливань. Акустичні хвилі, спрямовані вздовж фронту кристалізації, більшим чином інтенсифікують процес кристалізації води. При цьому у виморожену фазу захоплюється більша кількість розчину і масова частка розчинних речовин у розчині змінюється не значно;

- виморожування води із розчину на нижній поверхні горизонтального кристалізатора інтенсифікує процеси тепло- і масообміну в розчині на 20 – 30 %;

- застосування механічного відбору розчину із міжкристалічної структури твердої фази в процесі виморожування підвищує вихід концентрованого продукту на 13 – 15 % і скорочує тривалість процесу гравітаційного сепарування в 2 рази.

9. Отримані та уточненні критеріальні рівняння для розрахунку процесів тепло- і масовіддачі при виморожуванні води із природних і промислових вод, соків та екстрактів в умовах природної конвекції та при механічному перемішуванні розчину.

10. Розроблені інженерні методики та програми для розрахунку виморожуючих установок та процесів, які в них відбуваються. З використанням цих методик і програм розрахований параметричний ряд виморожуючих установок, оптимізовані режимні і конструктивні параметри, визначені техніко-економічні характеристики установок з потужністю по вихідній сировині від 200 до 10000 кг за цикл.

11. Розроблено технічне завдання на виробництво виморожуючих установок типу БЛС-П та технічну документацію на виробництво дослідної партії “Напою алкогольного “Глінтвейн” з кріоекстрактами пряно-ароматичної сировини” (ТУ У 15.9-26303655-30:2005).

12. Техніко-економічним обґрунтуванням, фізико-хімічними, санітарно-гігієнічними та мікробіологічними дослідженнями зразків рідких систем харчових виробництв, а також апробацією зразків виморожуючих установок та нової продукції підтверджена ефективність застосування виморожуючих установок в харчовій промисловості.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

Коваленко О.О. Кріоконцентрування соків / О.О. Коваленко, А.Т. Безусов, О.Г. Бурдо // Харчова і переробна промисловість. – 1997. – № 7. – С. 20 – 21.

Бурдо О.Г. Кинетика процессов блочного вымораживания из растворов / О.Г. Бурдо, Е.А. Коваленко, С.И. Милинчук // Вестник международной академии холода. – 2003. - № 3. - С. 38 - 41.

Коваленко Е.А. Энергетические аспекты низкотемпературной технологии получения вкусоароматических добавок / Е.А. Коваленко, С.И. Милинчук, Д.А. Харенко // Интегрированные технологии энергосбережения. – 2003. – № 2. – С. 13 - 17.

Коваленко О.О. Формування показників якості смакоароматичних добавок / О.О. Коваленко, Д.О. Харенко, О.Г. Бурдо // Вісник ДонДУЕТ. – 2003. - №1 (17). – С. 36 - 41.

Коваленко Е.А. Кинетика процессов блочного вымораживания воды из раствора в условиях воздействия на него акустических и механических колебаний // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2007. - Вип. 30, Т. 1. – С. 137 – 142.

Коваленко Е.А. Тепло- и массоперенос при низкотемпературном разделении жидких систем пищевых производств // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2006. – Вип. 28, Т. 2. – С. 164 – 174.

Коваленко О.О. Аналітичні дослідження умов низькотемпературної кристалізації харчових розчинів // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2004. - Вип. 27. – С. 210 - 213.

Коваленко О.О. Формування комплексного показника якості кріоконцентратів // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2003. - Вип. 26. – С. 196 - 200.

Коваленко О.О. Шляхи вдосконалення конструкції блочних виморожувачів // Обладнання та технології харчових виробництв. – Д.: ДонДУЕТ, 2006. – Вип. 15. – С. 105 - 113.

Коваленко Е.А. Математическая модель процессов переноса в блочном вымораживателе / Е.А. Коваленко, О.Б. Васылив // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2007. - Вип. 30, Т. 1. - С. 41 – 48.

Евдокимова О.А. Обобщение экспериментальных исследований процессов блочного вымораживания воды из солевых растворов в условия механического перемешивания раствора / О.А.Евдокимова, Е.А. Коваленко // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2007. - Вип. 30, Т. 1. - С. 157 – 163.

Реминная Л.П. Исследование кинетики блочного вымораживания воды из экстрактов на горизонтальном кристаллизаторе / Л.П. Реминная, О.Г. Бурдо, Е.А. Коваленко // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2007. - Вип. 30, Т. 1. - С. 164 – 169.

Харенко Д.А. Моделирование комбинированных процессов низкотемпературного разделения пищевых растворов / Д.А. Харенко, Е.А. Коваленко // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2006. - Вип. 29, Т. 1. – С. 9 – 14.

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

Криоконцентрирование соков и экстрактов / Е.А. Коваленко, О.Б. Васылив, Л.Н. Токарева, Л.П. Реминная // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2006. – Вип.28, Т. 2. – С. 130 – 135.

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

Харенко Д.А. Кинетика блочного вымораживания воды из раствора, в объеме которого пульсирует мембрана / Д.А. Харенко, Е.А. Коваленко, О.Г. Бурдо // Наук. пр. / ОДАХТ. – О., 2006. – Вип. 28, Т. 2. – С. 103 – 111.

Коваленко О.О. Експериментальні дослідження криоскопічних умов харчових розчинів / О.О. Коваленко, Л.М. Токарева, С.А. Малашевич // Наук. пр. /ОНАХТ. – О., 2004. - Вип. 27. - С. 205 – 210.

Расчет и проектирование оборудования для криоконцентрирования виноматериалов / О.Г. Бурдо, Е.А. Коваленко, С.И. Милинчук, В.П.Мордынский // Наук. пр. / ОДАХТ. – О., 2002.– Вип. 23.– С. 211 - 214.

Повышение эффективности процесса концентрирования пищевых жидкостей / О.Г. Бурдо, С.И. Милинчук, Е.А. Коваленко, Аль-згул Басам // Наук. пр. / ОДАХТ. – О., 2002. – Вип. 23. – С. 240 – 243.

Бурдо О.Г. Моделювання процесів тепломасопереносу при блочному виморожуванні / О.Г. Бурдо, С.І. Мілінчук, О.О. Коваленко // Наук. пр. / ОДАХТ. – О., 1999. – Вип. 20. – С. 214 – 218.

Бурдо О.Г. Энергозбереження в холодильних технологіях / О.Г. Бурдо, О.О. Коваленко, С.І. Мілінчук // Наук. пр. / ОДАХТ. – О., 1999. – Вип. 19. – С. 258 – 263.

Інтенсифікація тепломасопереносу та зниження енерговитрат при обезвожуванні харчових продуктів / О.Г. Бурдо, С. Гайда, О.І. Книш, О.О.Коваленко // Наук. пр. / ОДАХТ. – О., 1997. – Вип. 17. – С. 248 – 258.

Бурдо О.Г. Кінетика формування блока льоду при криоконцентруванні харчових рідин / О.Г. Бурдо, О.О. Коваленко // Наук. пр. / ОДАХТ. – О., 1996. – Вип. 16. – С. 248 – 252.

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. – О.:Імідж-Прес, 2007. – Вип. 37. - С. 134 – 137.

Енергоефективна технологія концентрування рідких систем харчових виробництв / О.Г. Бурдо, О.О. Коваленко, Д.О. Харенко, О.Б. Василів // Обладнання та технології харчових виробництв – Д.: ДонДУЕТ, 2006. – Вип. 15. – С. 125 - 131.

Бурдо О.Г. Дослідження комбінованих процесів блочного виморожування води з харчових розчинів / О.Г. Бурдо, О.О. Коваленко, Д.О. Харенко //Обладнання та технології харчових виробництв. – Д.: ДонДУЕТ, 2005. - Вип. 13, Т. 2. - С. 126 – 132.

Бурдо О. Г. Моделювання умов фазової рівноваги при блочному виморожуванні з харчових розчинів / Бурдо О.Г., Коваленко О.О., Л.М. Токарева//Обладнання та технології харчових виробництв. - Д.: ДонДУЕТ, 2005. – Вип. 13, Т. 2. - С. 274 – 282.

Коваленко Е.А. Теплофизические свойства экстрактов на основе растительного сырья / Е.А. Коваленко, О.Б. Васылив, Л.П. Реминная // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – Х., 2006. – Вип. 45. – С. 86 - 90.

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

Коваленко Е.А. Расчет процессов блочного вымораживания пищевых жидкостей / Е.А. Коваленко, О.Г. Бурдо // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі / ХДАТ та ОГ. –Х., 1998. - Ч.1. – С. 67 - 70.

Низкотемпературная технология переработки сельскохозяйственного сырья / Е.А. Коваленко, А.К. Бурдо, В.П. Мордынский, С.И. Милинчук // Пути повышения эффективности хранения и переработки сельскохозяйственной продукции / ОЦНТИ. – О., 1999. – С. 84 – 88.

ПАТ. 18607 Україна, МПК А 23 L 2/08. Спосіб отримання шляхом виморожування концентрованих рідких продуктів / О.Г. Бурдо, О.О. Коваленко, С.І. Мілінчук, Д.О. Харенко, О.Б. Василів. – № у 2006 05318; Заявл.15. 05. 2006; Опубл.15. 11. 2006, Бюл. № 11.

ПАТ. 23162 Україна, МПК А 23 L 2/08. Пристрій для отримання шляхом виморожування концентрованих рідких продуктів / О.Г. Бурдо, О.О. Коваленко, С.І. Мілінчук . - № у 2006 13409; Заявл. 18. 12. 2006; Опубл. 10. 05. 2007, Бюл. № 6.

ПАТ. 23132 Україна, МПК А 23 L 2/08. Спосіб отримання шляхом виморожування концентрованих рідких

продуктів / О.Г. Бурдо, О.О. Коваленко, С.І. Мілінчук, Л.П. Ремінна. - № у 2006 13021; Заявл.11. 12. 2006; Опубл.10. 05. 2007, Бюл. № 6.

Коваленко Е.А. Моделирование криоскопических температур пищевых растворов // IV семинар “Информационные системы и технологии”: Сб. науч. тр. / ОГАХ. – О., 2006 - С. 186 – 192.

Коваленко О.О. Енергетична ефективність низькотемпературних технологій розділення харчових розчинів // Енергоефективність 2004: Зб. наук. пр. Міжн. наук.-техн. конф. /ОДАХ – О., 2004. – С. 182 – 187.

Burdo O.G. Sumulation des processus de concentration des liquides alimentaires par refroidissement en bloc / O.G. Burdo, E.A. Kovalenko, S.I. Milinchuk //ACTES du seminaire d'animation regionale (Region Europe Centrale et Occidentale), SAR – 2004. - Chisinau: Tehnica-Info, 2004. – P. 305 - 309.

Бурдо О.Г. Энергоэффективная технология концентрирования пищевых растворов /О.Г. Бурдо, Е.А. Коваленко, С.И. Милинчук // Управління енерговикористанням: Зб. мат. 5-ої Міжнар. наук.-практ. конф. – О., 2003. - С. 47-51.

Modeling of processes of concentration of food solution by method of block freezing-out / O.G. Burdo, E.A. Kovalenko, S.I. Milinchuk, Basam Al-Zegoul // I Simp. Int. “Biochimie si biotehnologii in Industria Alimentara”: Mat. – Chisinau: Tehnica-Info, 2002. - P. 160 - 165.

Burdo O.G. Processing of food products with using of heat pipes / O.G. Burdo, S.G. Therziev, E.A. Kovalenko // I Simp. Int. “Biochimie si biotehnologii in Industria Alimentara”: Mat. – Chisinau: Tehnica-Info, 2002. – P. 166 - 169.

Бурдо О.Г. Сопряженный теплоперенос при кристаллизации из пищевых растворов /О.Г. Бурдо, С.И. Милинчук, Е.А. Коваленко //IV Межд. Форум “Тепломассообмен ММФ - 2000”: Тр. – Минск, 2000. –Т.5. – С. 399 – 407.

Heat Pipes in the Process and Apparatuses of Food Productions / O. Burdo, S. Gayda, E. Kovalenko, O. Stanevsky // 3th Int. Sem. "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators". – Minsk, 1997. – P. 130 – 134.

Коваленко Е.А. Технология концентрирования вишневого и абрикосового соков методом вымораживания / Е.А. Коваленко, А.Т. Безусов // Экология человека и проблемы воспитания молодых ученых: Тр. Межд. науч. – практ. конф. – О.: Астропринт, 1997. – Ч. II. - С. 21 - 25.

The new ways of organization heat transfer in food industry apparatuses /O. Burdo, S. Therziev, A. Knuish , E. Kovalenko // 5-th International Heat Pipe Symposium. – Melbourne, 1999. – Ref. No.: 4-7.

Burdo O. G. Kinetics formation of ice block in the process of concentration by freezing / O. G. Burdo, E.A. Kovalenko // 12-th International Congress of Chemical and Process Engineering. – Praha, 1996. – Ref. No.: 0882.

Коваленко О.О. Математична модель процесів виморожування води із харчових розчинів в апаратах з рухомою границею розділу фаз / О.О. Коваленко, О.Б. Василів // Математическое моделирование и информационные технологии : Сб. тез. науч. сем. – О.: ОГАХ, 2007. – С. 21 - 22.

Євдокимова О.О. Розробка блочного виморожувача для знесолення високомінералізованих природних вод та обезвожування промислових стоків / О.О. Євдокимова, О.О. Коваленко // Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів: Зб. доп. VI Міжн. наук. конф. асп. і студ. – Д.: ДонНТУ, ДонНУ, 2007. – Т. 1. – С.116 – 117.

Коваленко О.О. Модель процесів тепло- і масопереносу при виморожуванні води із харчових розчинів в апаратах з обмеженим фронтом кристалізації /О.О. Коваленко, О.Б. Василів // Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Мат. 73-ї наук. практ. конф. молод. вч., асп. і студ. – К.: НУХТ, 2007. – Ч. II. – С. 149.

Євдокимова О.А. Проблема дефицита пресной воды и пути ее решения с помощью холодильных технологий / О.А. Евдокимова, Е.А. Коваленко // Наукові дослідження – теорія та експеримент 2007: Мат. 3-ї Міжн. наук. практ. конф. – П.: Изд-во “ИнтерГрафіка”, 2007. – Т. 7. – С. 22 - 26.

Євдокимова О.О. Інтенсифікація процесів виморожування води із сольових розчинів / О.О. Євдокимова, О.О. Коваленко // Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Мат. 73-ї наук. практ. конф. молод. вч., асп. і студ. – К.: НУХТ, 2007. – Ч. II. – С. 147.

Ремінна Л.П. Вплив виду поверхні кристалізатора на процеси блочного виморожування води із харчових розчинів / Л.П. Ремінна, О.О. Коваленко // Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Мат. 73-ї наук. практ. конф. молод. вч., асп. і студ. – К.: НУХТ, 2007. – Ч. II. – С. 149.

Коваленко Е.А. Концентрирование вымораживанием экстрактов на основе растительного сырья / Е.А. Коваленко, Л.П. Реминная // Харчові технології – 2006: Тез. доп. II Міжн. наук.-практ. конф. – О., 2006. – С. 70.

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

Коваленко Е.А. Опреснение и очистка природных вод и промышленных стоков методом блочного вымораживания / Е.А. Коваленко, О.А. Евдокимова. // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Мат. 71-ї наук. конф. молод. вч., асп. і студ. - К.: НУХТ, 2005. – Ч. II. – С. 128.

Токарева Л.Н. Кинетика кристаллизации при блочном вымораживании воды из пищевых растворов / Л.Н. Токарева, О.Г. Бурдо, Е.А. Коваленко // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Мат. 71-ї наук. конф. молод. вч., асп. і студ. - К.: НУХТ, 2005. – Ч. II. – С. 127.

Харенко Д.А. Интенсификация процессов блочного вымораживания воды из растворов / Д.А. Харенко, Е.А. Коваленко, О.Г. Бурдо // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Мат. 71-ї наук. конф. молод. вч., асп. і студ. - К.: НУХТ, 2005. – Ч. II. – С. 129.

Коваленко О.О. Комбіновані процеси низькотемпературного розділення харчових розчинів / О.О. Коваленко, О.Г. Бурдо, Д.О. Харенко // Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка: Тез. доп. Міжн. наук.-техн. конф. – Д.: Дон ДУЕТ, 2005. – С. 89 – 90.

Коваленко О.О. Моделювання кріоскопічних умов харчових розчинів / О.О. Коваленко, О.Б. Василів, Л.М. Токарева // Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка: Тез. доп. Міжн. наук.-техн. конф. – Д.: Дон ДУЕТ, 2005. – С. 91 – 92.

Євдокимова О.О. Блочні виморожувачі для опріснення природних вод і обезвоження промислових стоків / О.О. Євдокимова, О.О. Коваленко, О.Г. Бурдо // Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка: Тез. доп. Міжн. наук.-техн. конф. – Д.: Дон ДУЕТ, 2005. – С. 62 – 63.

Коваленко О.О. Формування методики розрахунку кріоскопічних умов харчових розчинів / О.О. Коваленко, О.Б. Василів // Харчові технології – 2005: Тез. доп. Міжн. наук.-практ. конф. – О., 2005. – С. 27.

Коваленко Е.А. Вымораживающие установки для водоподготовки в пищевых производствах / Е.А. Коваленко, О.А. Евдокимова // Харчові технології – 2005: Тез. доп. Міжн. наук.-практ. конф. – О., 2005. – С.25.

Токарева Л.М. Кинетика кріоконцентрування соків і екстрактів / Л.М. Токарева, О.О. Коваленко, С.А. Малашевич // Харчові технології – 2005: Тез. доп. Міжн. наук.-практ. конф. – О., 2005. – С. 35.

Харенко Д.О. Моделювання комбінованих процесів низькотемпературного розділення харчових розчинів / Д.О. Харенко, О.О. Коваленко, Бурдо О.Г. // Харчові технології – 2005: Тез. доп. Міжн. наук.-практ. конф. – О., 2005. – С. 26.

Бурдо О.Г. Теория сопряженных процессов тепломассообмена и гидродинамики в криоразделительных аппаратах / О.Г. Бурдо, Е.А. Коваленко // IV Межд. конф. “Проблемы промышленной теплотехники”: Мат. – К., 2005. – С. 53 – 54.

Бурдо О.Г. Энергоэффективная технология концентрирования пищевых растворов / О.Г. Бурдо, Е.А. Коваленко, С.И. Милинчук // III Межд. выст. “Электроника и энергетика 2003” и II спец. выст. “Станкомаш ЭКСПО 2003”: Тр. – О.: Морьяк, 2003. – С. 279 – 280.

Коваленко О.О. Оцінка якості смакоароматичних добавок / О.О. Коваленко, Д.О. Харенко, О.Г. Бурдо // Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка: Тез. доп. Міжн. наук.-практ. конф. –Д.: ДонДУЕТ, 2003. - С. 187-189.

Коваленко О.О. Технологія та обладнання для виробництва рідких харчових кріоконцентратів / О.О. Коваленко, А.К. Бурдо, С.І. Мілінчук // VI Міжн. наук.-техн. конф. “Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості”. – К.: УДУХТ, 2000 – С. 71 – 72.

Кріоконцентрування в харчових технологіях / О. Бурдо, О. Коваленко, С. Мілінчук, А. Бурдо //X Міжн. конф. “Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв”: Тез. доп. – Л.: ДУЛП, 1999. – С. 102.

Безусов А. Т. Концентрирование соков методом блочного вымораживания и производство продуктов на основе кріоконцентратов / А. Т. Безусов, О.Г. Бурдо, Е.А. Коваленко // Людина та навколишнє середовище – проблеми безперервної екологічної освіти в вузах: Зб. наук. пр. – О.: ОДАХ, 1996. – С. 89.

Бурдо О.Г. Кінетика формування блоку льоду при кріоконцентруванні виморожуванням / О.Г. Бурдо, О.О. Коваленко // 56 Научная конференция: Тез. докл. – О.: ОГАПТ, 1996. – Ч. I. - С. 189.

Бурдо О.Г. Отримання прісної води з морської методом блочного виморожування / О.Г. Бурдо, О.О.

Коваленко // Сучасні проблеми водопостачання і знешкодження стічних вод: Тез. доп. – Л., 1996. – С. 341 – 342.

Коваленко Е.А. Теплофизические и технологические аспекты концентрирования соков методом блочного вымораживания / Е.А. Коваленко, А.Т. Безусов, О.Г. Бурдо // IX Міжн. конф. “Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв”: Тез. доп. – О., 1996. – С. 77.

Коваленко Е. А. Экспериментальные исследования процесса концентрирования фруктово-овощных соков вымораживанием / Е.А. Коваленко, Е.Ф. Терземан, А.К. Бурдо // 55 Научная конференция: Тез. докл. – О.: ОГАПТ, 1995. – Ч. I. - С. 85.

Шиянов А.И. Сравнительный анализ различных методов концентрирования фруктово-овощных соков / А.И. Шиянов, Е.А. Коваленко // 55 Научная конференция: Тез. докл. – О.: ОГАПТ, 1995. – С. 243.

Особистий внесок здобувача у наукові роботи:

проведення літературного аналізу, узагальнення результатів, підготовка матеріалів до публікації (поз.3, 4, 14 - 16, 20, 23, 25, 32, 37, 40, 42 - 44, 46, 58, 60, 62, 66, 68, 72, 75);

створення математичних моделей та методик, узагальнення результатів, підготовка матеріалів до публікації (поз.2, 6 - 8, 10, 19, 21, 28, 31, 36, 39, 41, 43, 47, 48, 50, 59, 61, 65);

виконання експериментальних досліджень, узагальнення результатів, підготовка матеріалів до публікації (поз.1, 4, 5, 9, 18, 22, 24, 43, 45, 47, 65, 67, 69, 70, 71, 73, 74);

керівництво і участь в аналітичних та експериментальних дослідженнях, узагальнення результатів, підготовка матеріалів до публікації (поз.11 - 17, 26, 27, 29, 30, 38, 49, 51 - 58, 63, 64);

розроблення деклараційних патентів та складання їх опису, складання та редагування формул винаходів, теоретичне обґрунтування запропонованих рішень, узагальнення результатів, підготовка матеріалів до публікації (поз.33,34,35).

АНОТАЦІЯ

Коваленко О.О. “Науково-технічні основи процесів низькотемпературного розділення рідких систем харчових виробництв”.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв, Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2007.

Дисертаційна робота присвячена розробці теоретичних і практичних основ, спрямованих на розвиток в Україні низькотемпературних технологій та підвищення ефективності роботи виморожуючих установок. Розроблена структура комплексного показника якості виморожуючих установок, який враховує вплив температурного режиму роботи установки на її техніко-економічні параметри та якість розчину і дозволяє оптимізувати режимні та конструктивні параметри. Вдосконалена математична модель процесу виморожування води із розчинів шляхом доповнення її рівняннями для розрахунку: температури на границі розділу фаз для умов змінної температури і масової частки розчинних речовин у розчині; масової частки розчинних речовин у розчині в залежності від різниці температур між температурою на фронті кристалізації і температурою розчину; критеріальних рівнянь для розрахунку тепло- і масовіддачі в розчині; рівноважної температури розчину при фазовому перетворенні “розчин→лід+розчин” в залежності від хімічного складу розчину та активності води у рідкій і вимороженій фазі; коефіцієнту теплопровідності вимороженої фази в залежності від масової частки розчинних в ній речовин. З використанням отриманої математичної моделі виконаний розрахунок кінетики процесів тепло- і масопереносу та розрахований параметричний ряд виморожуючих установок. В результаті проведеної оптимізації по комплексному

показнику якості отримані оптимальні конструктивні та режимні параметри виморожуючої установки. Для оптимальних умов розраховані техніко-економічні характеристики виморожуючих установок з потужністю по вихідній сировині від 0,2 до 10 т за цикл. Техніко-економічним обґрунтуванням та промисловою апробацією зразків обладнання та продукції підтверджена ефективність застосування виморожуючих установок в харчових виробництвах.

Ключові слова: низькотемпературне розділення, рідкі системи харчових виробництв, виморожуючі установки, комплексний показник якості, математичне й експериментальне моделювання, методики розрахунку, оптимізація, апробація.

АННОТАЦІЯ

Коваленко Е.А. "Научно-технические основы процессов низкотемпературного разделения жидких систем пищевых производств".

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

Диссертационная работа посвящена разработке теоретических и практических основ, направленных на развитие в Украине низкотемпературных технологий и повышение эффективности работы вымораживающих установок. Разработана структура комплексного показателя качества вымораживающих установок, которая учитывает влияние температурного режима работы установки на ее технико-экономические параметры и качество раствора. Такой показатель позволяет оптимизировать режимные и конструктивные параметры установки, а также позволяет оценивать эффективность технологий, использующих различные способы разделения раствора на условно чистую воду и концентрированный остаток. Усовершенствованна математическая модель процесса вымораживания воды из растворов на поверхности вертикальных труб и с формированием твердой фазы виде блоков льда.

Характерным для предложенной модели является разделение твердой фазы на ряд прослоек (внутренних и фронтальную), которые отличаются теплофизическими свойствами из-за разной температуры прослоек и разного содержания растворенных веществ. Кроме этого, для фронтальной прослойки характерным является то, что в ней кристаллизация воды осуществляется по всему объему и при температуре, которая равна температуре фазового превращения раствора. Представлены, полученные аналитическим путем, уравнения для расчета температуры на границе раздела фаз для условий изменяющихся температуры и массовой доли растворенных веществ в растворе, а также для расчета коэффициента теплопроводности вымороженной фазы. Разработаны структуры критериальных уравнений для обобщения экспериментальных данных по тепло- и массоотдаче в растворе. Представлены принципиальные схемы использования вымораживающих установок в пищевых производствах. Определены способы и обоснованы механизмы интенсификации процессов тепло- и массообмена в вымораживающей установке. Согласно задачам, сформулированным при математическом моделировании, выполнен комплекс экспериментальных исследований: криоскопических; теплофизических свойств растворов и вымороженной из них твердой фазы; кинетических закономерностей процессов в вымораживающей установке для условий естественной и вынужденной конвекции в

растворе. Результаты экспериментальных исследований обобщены в виде уравнений для расчета: равновесной температуры раствора при фазовом превращении "раствор→лед+раствор" в зависимости от химического состава раствора и активности воды в вымороженной фазе; коэффициента теплопроводности вымороженной фазы в зависимости от массовой доли растворенных в ней веществ; плотности ряда жидких систем пищевых производств в зависимости от массовой доли растворенных веществ и температуры; массовой доли растворенных веществ в растворе в зависимости от разницы температур между температурой на фронте кристаллизации и температурой раствора; тепло- и массоотдачи в различных растворах при вымораживании из них воды. На основе результатов аналитических и экспериментальных исследований разработана структура расчета вымораживающей установки, которая включает этапы расчета криоскопической кривой раствора, теплофизических свойств раствора и вымороженной фазы, кинетики процессов тепло- и массообмена, конструктивных, технико-экономических и оптимальных параметров вымораживающей установки. Каждый этап расчета представлен в виде методик, алгоритмов и компьютерных программ. С использованием разработанных методик и программ рассчитан параметрический ряд вымораживающих установок и проведена оптимизация режимных и конструктивных параметров. Для оптимизации использовался метод последовательного квадратичного программирования, в котором поиск максимума осуществлялся с помощью стандартной функции, реализующей квази-ньютоновский метод линейного поиска. Оптимизация осуществлялась по разработанному комплексному показателю качества вымораживающей установки, а в качестве параметров оптимизации были приняты длительность процесса, температурный режим работы установки и геометрические размеры кристаллизатора. Для определенных оптимальных условий рассчитаны технико-экономические характеристики вымораживающих установок с мощностью по исходному сырью от 0,2 до 10 т за цикл. Выполненным сравнительным технико-экономическим анализом технологий, которые используют различные способы разделения жидких систем пищевых производств, а также сравнительным анализом физико-химических показателей качества продукции, полученной с помощью разных технологий, обоснованно целесообразность использования вымораживающих установок в пищевой промышленности. Представлены результаты апробации образцов вымораживающих установок и продукции на предприятиях отрасли, рассчитаны экономические эффекты от их внедрения и определена социально-практическая значимость результатов выполненных диссертационных исследований.

Ключевые слова: низкотемпературное разделение, жидкие системы пищевых производств, вымораживающие установки, комплексный показатель качества, математическое и экспериментальное моделирование, методики расчета, оптимизация, апробация.

THE SUMMARY

Kovalenko O.O. "Scientific and technical basis of the processes of low-temperature separation of food productions liquid system".

Dissertation for scientific degree of Doctor of technical science on speciality 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2007.

The dissertation is devoted to working out of the theoretical and practical bases, designed for development of low-temperature technologies and increase of efficiency of freezing installations operations in Ukraine.

The structure of the complex index of the freezing installations quality, which takes into account influence of temperature conditions of the installation operation on its technical and economical parameters and the solution quality and allows to optimize mode and construction parameters, has been worked out. The improved mathematical model of the process of water freezing from solutions by addition to it the equations has been given for calculation: temperature on the movable boundary of phase division for conditions of changing temperature and mass share of soluble substances in the solution; mass share of soluble substances in the solution depending on temperature gradient between temperature on crystallization front and solution temperature; criterion equations for calculation heat- and mass output in the solution; equilibrium temperature of the solution during phase transition “solution – ice” depending on the solution chemical composition and water activity in the freezing out phase; coefficient of thermal conductivity of the freezing out phase depending on mass share of the soluble substances in its melt.

The calculation of kinetics of heat- and mass transfer processes with application of the obtained mathematical model has been carried out; parametric series of the freezing installations has been calculated. As s results of the carried out optimization, according to the quality complex index, the optimum construction and mode parameters of the freezing installation have been obtained. Technical and economical characteristics of the freezing installation with power on initial raw material from 0.2 to 10 t per cycle have been calculated for optimum conditions. The efficiency of freezing installations has been corroborated by technical and economic grounds and industrial approbation of equipment and production samples.

Key words: low-temperature separation, liquid system of food productions, freezing installations complex index of quality, mathematical and experimental modelling, methods of calculations, optimization.

Підписано до друку 15.11.2007 р. Формат 60х90/16.
Умовн. друк. арк. 1,8. Тираж 100 прим. Зам. № _____