

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

ЛИСИЦЯ ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 536.244:664.8.037.52

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ШВИДКОГО ЗАМОРОЖУВАННЯ
ЯГІД В ПОТОЦІ ГАЗУ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

Петухов Ілля Іванович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»,
доцент кафедри аерокосмічної теплотехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент

Потапов Володимир Олексійович,
Харківський державний університет харчування
та торгівлі, завідувач кафедри
холодильної та торговельної техніки

кандидат технічних наук, доцент

Василів Олег Богданович,
Одеська національна академія харчових технологій,
доцент кафедри теплохолодотехніки

Захист відбудеться «20» травня 2011 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.088.01 Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

Автореферат розісланий «15» квітня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.А. Дубініна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Обмежений термін зберігання в свіжому вигляді продуктів рослинного походження зумовлює необхідність їх консервування з метою споживання протягом всього року. Особливо важливо це для ягід. Пріоритетними тут є технології консервування, що дозволяють максимально зберегти вітамінний склад, смакові та поживні властивості, зовнішній вигляд продукту. Найповніше ці умови забезпечуються при заморожуванні. Розроблені на сьогоднішній день безліч способів заморожування і відповідного устаткування відображають пошук компромісу між збереженням властивостей початкового продукту, експлуатаційними та капітальними затратами.

Останніми роками все більше розповсюдження знаходить швидке заморожування в газовому середовищі. Застосування тут криогенних азотних технологій в порівнянні з традиційними дозволяє забезпечити зниження температури і зростання швидкості заморожування, внаслідок чого утворюється велика кількість дрібних кристалів льоду розмірами 10...40 мкм, рівномірно розподілених як в клітинах, так і в міжклітинному просторі. При цьому не порушується цілісність клітинної структури, уповільнюються окислювальні та ферментативні процеси, зменшуються в 3...5 разів втрати тканинного соку при розморожуванні.

Азотні установки відносно прості у виготовленні, мають можливість повної автоматизації, надійні в експлуатації, екологічно безпечні. Невеликі габарити і мале енергоспоживання дозволяють використовувати їх безпосередньо в місцях збору ягід.

Для підвищення ефективності установок необхідно максимально використовувати холодоресурс азоту, що вимагає достовірних даних про поле швидкості і температури потоку газу в установці, інтенсивність теплопереносу. В той же час, для якнайповнішого збереження властивостей продукту після розморожування, що є основним доводом на користь азотних технологій, необхідне детальніше і глибше вивчення закономірностей процесів усередині продукту, які визначаються, в основному, температурою поверхні та її зміною в часі.

Серед великої кількості вчених, які плідно працювали в рамках даних проблем, необхідно назвати такі імена: Алмаши Э., Головкін М.О., Груби Я., Дібірасулаєв М.А., Куцакова В.С., Оніщенко В.П., Павлюк Р.Ю., Постольські Я., Чижов Г.Б., Чумак І. Г., Cleland A.C., Fikiin K.A., Pham Q.T.

Використовувані на практиці «класичні» формули, наприклад, для визначення тривалості заморожування дають велику похибку і взагалі не несуть інформації про поля температури та частки вимороженої води, теплові потоки та навантаження на холодильне обладнання. Наявні ж в літературі сучасні підходи відносяться до окремих продуктів та конкретних умов протікання процесу, не враховують процеси дифузії розчинених речовин. Таким чином, удосконалення процесу швидкого заморожування ягід в потоці газу є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в період з 2003 по 2011 р. відповідно до тематичних планів наукових досліджень кафедри аерокосмічної теплотехніки Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», в рамках держбюджетної теми № Г205-23/2006 (0106U001051) «Методи

моделювання теплогідравлічних процесів в об'єктах авіаційно-космічної техніки, енергетики, харчової та переробної промисловості». Тематика роботи відповідає визначеним Законом України «Про енергозбереження» пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, напрямкам навчальної діяльності та наукових досліджень кафедри.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення процесу швидкого заморожування ягід в потоці газу шляхом доробки розрахункової моделі, обладнання для швидкого заморожування та визначення технологічних режимів, що забезпечують якнайповніше збереження початкових властивостей продукту і зниження енерговитрат.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні завдання:

- удосконалення фізичної і математичної моделей процесу заморожування ягід в потоці газу в частині врахування дифузії розчинених речовин, форми ягоди і теплофізичних характеристик;

- чисельне моделювання процесу заморожування ягід в потоці газу з метою встановлення зв'язку між параметрами газового потоку і параметрами ягоди;

- експериментальне дослідження процесу заморожування ягід в потоці газу і впливу режимів заморожування на ступінь збереження початкових властивостей ягід;

- аналіз впливу відмінності форми ягоди від сфери при швидкому заморожуванні в потоці газу на тривалість процесу і температурне поле в ягоді; оцінка впливу наявності термопари в товщі продукту на його температурне поле при заморожуванні;

- обґрунтування параметрів потоку газу, що забезпечують раціональне використання його холодоресурсу;

- розрахунок полів температури і швидкості потоку газу в установках заданої геометрії з метою визначення раціональних режимів заморожування ягід; розробка техніко-технологічних рекомендацій щодо проведення процесів заморожування ягід;

- апробація методики розрахунку процесу заморожування ягід на реальних зразках устаткування;

- розробка рекомендацій з конструктивного доопрацювання стаціонарних низькотемпературних холодильних камер з метою підвищення ефективності їх роботи.

Об'єкт дослідження – процес тепломасопереносу при заморожуванні ягід в потоці газу.

Предмет дослідження – швидкоморозильний тунельний апарат (ШТА) і технологічні режими заморожування ягід в ньому.

Методи дослідження – методи математичного моделювання і теорії диференційного та інтегрального числень, методи теорії подібності і фізичного моделювання, експериментальні методи вимірювання параметрів в процесі теплопереносу, лабораторні методи, встановлені державними стандартами, для визначення фізичних і біохімічних показників.

Наукова новизна одержаних результатів. На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень уперше:

- в рамках моделі заморожування з рухомими межами розділу фаз з урахуванням тепломасопереносу, дифузії розчинених речовин, температурної залежності теплофізичних характеристик (ТФХ), зміни температури початку кристалізації рідкої фази тканинного соку отримано поля температури і концентрації розчинених речовин; достовірність моделі підтверджена при зіставленні результатів чисельного дослідження з експериментальними даними, а також з результатами інших авторів;

- показано зв'язок режимних параметрів у ШТА при заморожуванні ягід зі ступенем збереження масової частки вологи, вітаміну С і антоціанових барвних речовин в ягодах після розморожування; для чорної смородини, малини і вишні кращим є режим, що забезпечує в камері попереднього охолодження температуру газу і коефіцієнт тепловіддачі: мінус 20°C і 10...14 Вт/(м²·К) відповідно; у камері заморожування і вирівнювання температури – мінус 65°C і 26...36 Вт/(м²·К) відповідно;

- показано зв'язок режимних параметрів газу з полем концентрації розчинених речовин. Визначено діапазон швидкостей потоку, при яких забезпечується рівномірність поля концентрацій розчинених речовин, що відповідає максимальному збереженню властивостей продукту; для чорної смородини при температурі потоку мінус 40°C швидкість складає 1 м/с і вище;

- виконано ідентифікацію показів термопар в ядрі ягоди при швидкому заморожуванні; показано, що спай термопар фіксує середньооб'ємну температуру; при діаметрі спаю до 0,06 розміру ягоди відмінність температури в ягоді з термопарою і ягоді без термопар не перевищує 1 К;

- для ШТА з введенням рідкого азоту через форсунки чисельним способом визначено поле температури усередині установки під час заморожування, що дозволяє сформулювати граничні умови для розрахунку процесу заморожування ягід та ідентифікувати раціональні режими заморожування за температурою газового середовища.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- розроблено методику та комп'ютерні програми розрахунку процесу заморожування ягід в потоці газу, що дозволяють визначити локальні параметри середовищ у будь-який момент заморожування і ТФХ досліджуваних продуктів;

- отримані в роботі результати дозволили спроектувати, виготовити і налагодити азотний ШТА для заморожування ягід;

- результати розрахунку процесу заморожування ягід по розробленій моделі дозволили реалізувати систему управління, що забезпечує максимальне збереження властивостей початкового продукту при зниженні енерговитрат;

- сформовано вимоги до технологічних регламентів заморожування чорної смородини, малини і вишні в ШТА та представлено схему технологічної лінії виробництва вказаних заморожених ягід;

– розроблено та реалізовано схему утилізації холодоресурсу рідкого азоту, що дозволяє зменшити витрати азоту на 15%; для реалізації цього було спроектовано та виготовлено ізотермічні камери для зберігання замороженого продукту та попереднього його охолодження перед завантаженням в ШТА;

– для промислової холодильної камери з урахуванням наявності лотків з продуктом, повітроохолоджувача, повітряних відбійників, «фальш-стелі» і направляючої пластини отримано поле швидкості в камері; результати розрахунку просторових поля швидкостей та температури дозволили обґрунтовано проектувати і модернізувати холодильні камери, вибрати повітроохолоджувачі для них.

Реалізація результатів роботи. Розроблено, виготовлено, налагоджено та впроваджено у навчальний процес НАУ «ХАІ» ШТА (акт від 19.01.2010), розроблено та впроваджено у виробництво рекомендації щодо конструктивного доопрацювання промислових холодильних камер на науково-виробничому підприємстві НВП «Інсолар» (м. Харків, акт від 09.09.2010), розроблено та виготовлено лабораторну установку для експериментального дослідження процесу заморожування твердих та рідких харчових продуктів та впроваджено її у навчальний процес ХДУХТ (акт від 16.11.2010), результати розрахунку поля швидкостей в складних каналах були використані при проектуванні запічного теплообмінного апарату в лабораторії «Удосконалення процесів і устаткування в'язучих матеріалів» при Харківському державному технічному університеті будівництва та архітектури (м. Харків, акт від 01.12.2010).

Особистий внесок здобувача полягає в отриманні наукових результатів, плануванні, постановці та проведенні експериментальних досліджень, обробці дослідних даних, їх теоретичному обґрунтуванні, узагальненні отриманих результатів, формулюванні висновків, здійсненні заходів щодо впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво та навчальний процес.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи обговорювались та були схвалені на IV міжнародній конференції «Проблеми промислової теплотехніки» (м. Київ, 2005), міжнародних науково-технічних конференціях «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» ІКТМ 2004-2007, 2009 (м. Харків, 2004-2007, 2009), науковому семінарі «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2007), всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2008), міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі» (м. Харків, 2008), всеукраїнській науково-практичній конференції «Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Економічна стратегія та перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг» (м. Харків, 2009), міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології оздоровчих продуктів харчування XXI століття» (м. Харків, 2010), всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми техніки та технології харчових виробництв, ресторанного бізнесу та торгівлі» (м. Харків, 2010).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України, 9 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 12 додатків, а також списку використаних джерел, що включає 125 найменувань. Дисертацію викладено на 159 сторінках друкованого тексту, вона містить 74 рисунка і 19 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі «Аналіз процесів заморожування харчових продуктів» проаналізовано теоретичні та експериментальні роботи, присвячені питанням заморожування харчових продуктів, фізичному та математичному моделюванню процесу заморожування в потоці газу. Наведено переваги швидкого заморожування перед іншими способами консервування, способи та устаткування для швидкого заморожування ягід в потоці газу. Розглянуто особливості будови харчових продуктів, зокрема ягід, та процеси кристалізації в них вологи.

Проаналізовано причини погіршення якості продукту, що спостерігаються після розморожування. Головною з них є руйнування кристалами льоду клітинних стінок. Цей ефект можна зменшити, зокрема, підвищенням швидкості заморожування. В той же час, надмірно високі швидкості заморожування призводять до розтріскування поверхні ягоди внаслідок великої температурної напруги. Відзначено основні недоліки існуючих на сьогоднішній день способів заморожування, режимів та устаткування для їх реалізації, серед яких низький холодильний коефіцієнт, складність конструкції, відсутність технологічних режимів для багатьох продуктів. Актуальним є і максимальне використання холодоресурсу охолоджуючого газу.

У частині розрахунків процесів заморожування також є безліч невіршених питань. Зокрема, з низькою точністю описуються поля температур та частки вимороженої води, фазові перетворення, граничні умови. Практично не дослідженими є питання розподілу розчинених речовин між твердою і рідкою частинами ягоди, впливу цього розподілу на процес заморожування. Мало уваги приділено і питанням дослідження ТФХ харчових продуктів. Часто значення ефективного коефіцієнта теплопровідності, питомої теплоємності, густини як найбільш важливі, взагалі представлені константами. Насправді ж, ТФХ істотно залежать і від температури, і від складу ягоди.

Проаналізовано два основні підходи до моделювання процесів заморожування харчових продуктів. Це рішення задачі з рухомими межами фаз і рішення нестационарної нелінійної задачі теплопровідності. У результаті аналізу наявної інформації сформульовано основні завдання роботи.

У другому розділі «Чисельне дослідження процесу заморожування ягід» представлено розрахунки температурної залежності ТФХ ягід, фізичну та математичну моделі процесу за-

морожування ягід в потоці газу, результати апробації моделі, а також розрахунки за допомогою стандартизованого пакету програм (CFD-моделювання).

Розроблена модель дозволяє враховувати залежність ТФХ від температури, процеси дифузії розчинених речовин, зміну температури початку кристалізації рідкої фази при заморожуванні. Згідно з прийнятою моделлю ягода розбивається на три зони: рідку, тверду і двофазну, в якій рідина охолоджена до температури початку кристалізації, але процес фазового переходу ще не завершений.

У початковий момент часу речовина ягоди має однорідний профіль температури і концентрації розчинених речовин. Їх зміна в часі описується рівняннями теплопровідності (1) і дифузії (2) в сферичних координатах без внутрішніх джерел теплоти. Задача вважається сферично симетричною (3а, 3б). На поверхні ягоди задаються граничні умови III роду (4). Для двофазної області записується рівняння швидкості зміни масової частки твердої фази (5). Рівняння дифузії інтегрується тільки в межах рідкої фази. Таким чином, система рівнянь має вигляд:

$$c_j \rho_j \frac{\partial T_j}{\partial \tau} = \frac{\partial \lambda_j}{\partial r} \frac{\partial T_j}{\partial r} + \lambda_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} + \lambda_j \frac{2}{r} \frac{\partial T_j}{\partial r}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (3a, 3b)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\sigma} = \alpha (T_{\sigma} - T_c), \quad (4)$$

$$\frac{dx_s}{\partial \tau} = \frac{Q_s - Q_l}{m_f \psi}, \quad (5)$$

де c – питома теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³, T – температура, К; τ – час, с; λ – ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); r – радіус, м; C – концентрація розчинених речовин, кг/м³; D – коефіцієнт дифузії, м²/с, α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К; x_s – масова частка твердої фази; m_f – маса речовини в двофазній зоні, кг; ψ – прихована теплота кристалізації, Дж/кг; σ – індекс, що характеризує параметри на поверхні ягоди; c – параметри потоку; j – тверда ($j=s$) або рідка ($j=l$) фази.

Система (1-5) замикається рівняннями, що описують ТФХ продукту, і співвідношеннями, які конкретизують граничні умови III роду.

Для отримання замикаючих рівнянь системи (1-5) було проведено дослідження ТФХ, в результаті якого отримано температурні залежності густини, ефективної теплоємності і коефіцієнта ефективної теплопровідності, які представлено для діапазону температур 20...мінус 40°C. Ягоди розглядалися як гетерогенні ізотропні системи. Для визначення густини і ефективної теплоємності продукту використовувався адитивний підхід. Для визначення коефіціє-

нта ефективної теплопровідності розраховувався взаємний вплив складових ягоди (суха частина, вода, лід, атмосферні гази). За основу було прийнято методику професора Оніщенка В.П. та дані з довідника ASHRAE.

Результати розрахунків по розробленій моделі порівнювалися з експериментальними даними (рис. 1) та з результатами інших авторів. Аналіз результатів показав, що модель достатньо точно описує процес швидкого заморожування ягід. Похибка у визначенні тривалості заморожування не перевищують 9%.

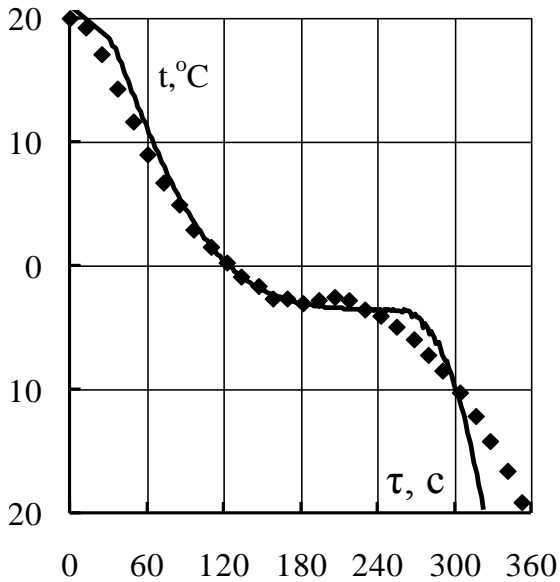


Рис. 1. Динаміка температури в ядрі ягоди: \blacklozenge експеримент; \square розрахунок

Для раціонального використання холодоресурсу газу було розраховано вплив режимних параметрів на тривалість заморожування (рис. 2). Із його аналізу можна сказати, що зниження температури охолоджуючого потоку нижче мінус 40°C , рівно як і збільшення його швидкості більше 5 м/с не дає суттєвого зменшення тривалості заморожування.

Відзначимо, що на початковому етапі дослідження процесів заморожування окремих ягід був обраний виноград по причині доступності протягом усього року та підходящої геометрії для розміщення термодатчиків. Основні ж дослідження проводилися для чорної смородини, малини та вишні, розташованих в лотках.

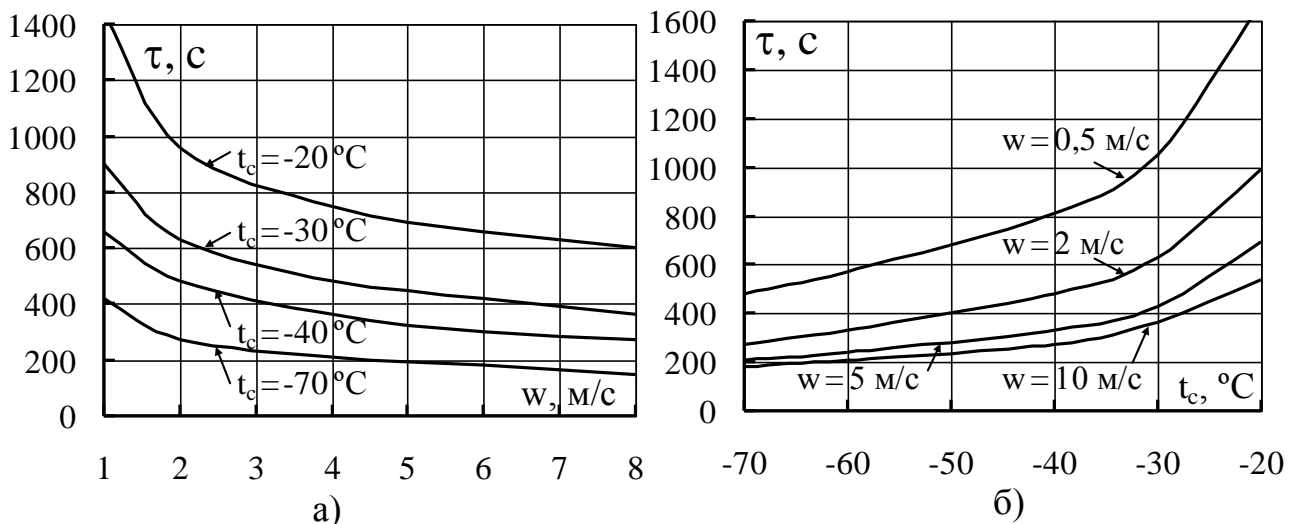


Рис. 2. Вплив параметрів потоку на тривалість заморожування: а) вплив швидкості потоку при різних його температурах; б) вплив температури потоку при різних його швидкостях

Для отримання даних про параметри всередині ягоди при заморожуванні було розраховано і побудовано профілі температури та концентрації розчинених речовин (рис. 3). Резуль-

тати представлено для характерних моментів часу від початку заморожування. Ці дані дозволяють оцінювати ступінь збереження властивостей початкового продукту після розморожування не по параметрах потоку, а по внутрішніх параметрах продукту, що є більш точним.

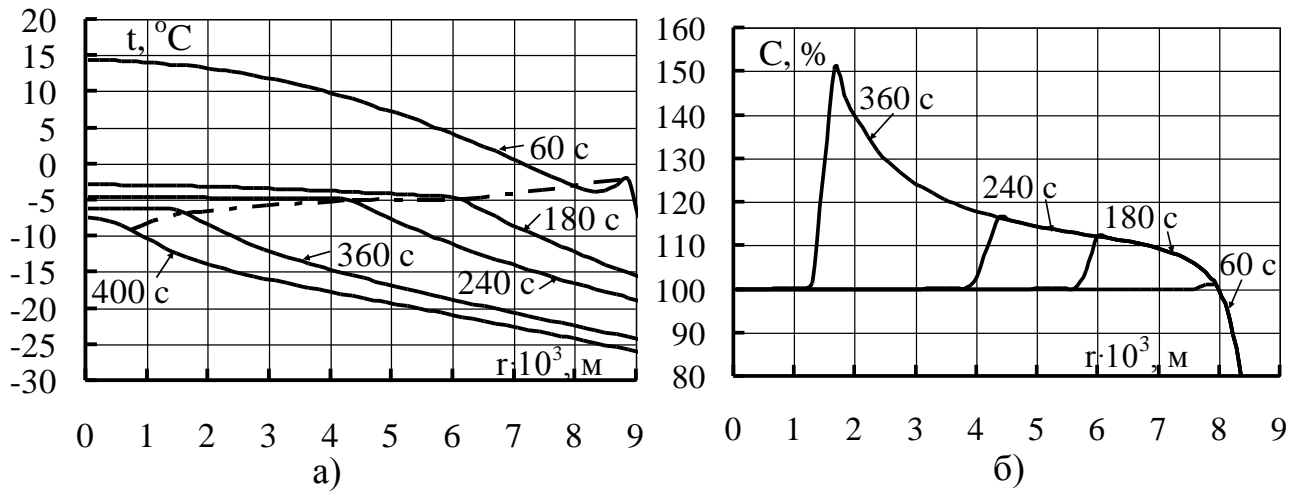


Рис. 3. Профілі температури (а) та концентрації розчинених речовин (б) в ягоді діаметром 18 мм при заморожуванні її зі швидкістю потоку 3,8 м/с, температурою мінус 40°C;
 - - - температура початку кристалізації

Для характеристики ступеня розподілу розчинених речовин між фронтом початку кристалізації та рідкою частиною ягоди по аналогії з роботами професора Чумака І.Г. і професора Коваленко О.О. було введено коефіцієнт захоплення розчинених речовин фронтом початку кристалізації. Це дозволило по рівномірності розподілу розчинених речовин після заморожування говорити про ступінь збереження початкових властивостей продукту.

На базі запропонованої моделі розрахунку процесів заморожування ягід проводилися також розрахунки і для ягід в засипці (рис. 4).

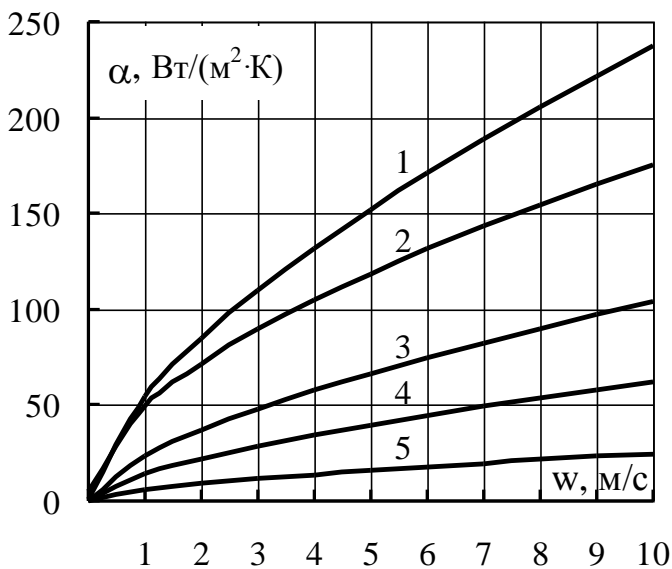


Рис. 4. Залежність коефіцієнту тепловіддачі

α від швидкості потоку для різної пористості пакету: 1 – 0,476; 3 – 0,2; 4 – 0,1; 5 – 0,026; 2 – окрема ягода

Основною відмінністю тут буде задавання відповідних граничних умов. В даному випадку коефіцієнта тепловіддачі.

Одним з основних недоліків розробленої моделі є неможливість моделювання заморожування тіл довільної геометричної форми, що є характерним для більшості ягід. Ця проблема була вирішена за допомогою CFD-моделювання. Для успішного його використання були розроблені та підключені додаткові підпрограми. Результати цих розрахунків порівнювалися з розрахунками і експериментами інших авторів.

Удосконалена CFD-модель, крім вищесказаного, дозволяє моделювати процес холодильної обробки харчового продукту довільної геометричної форми з протікаючими в ньому фазовими переходами, як з урахуванням теплоти фазового переходу в явному вигляді, так і в значенні ефективної теплоємності. Результати розрахунку полів температури в ягодах різної геометричної форми при температурі газу мінус 40°C , швидкості $w=1$ м/с представлено на рис. 5 і рис. 6.

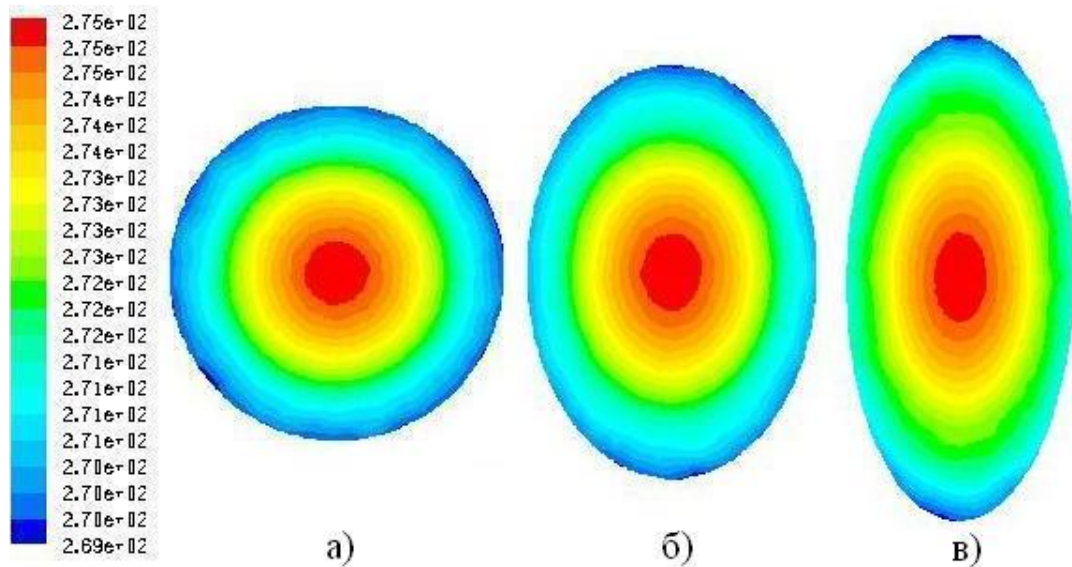


Рис. 5. Поле температури в ягодах різної геометрії в момент часу $\tau=240$ с: а) – сфера $d=18$ мм; б) – еліпсоїдна з осями $8\times 8\times 11,4$ мм; в) – еліпсоїдна з осями $7\times 7\times 14,9$ мм

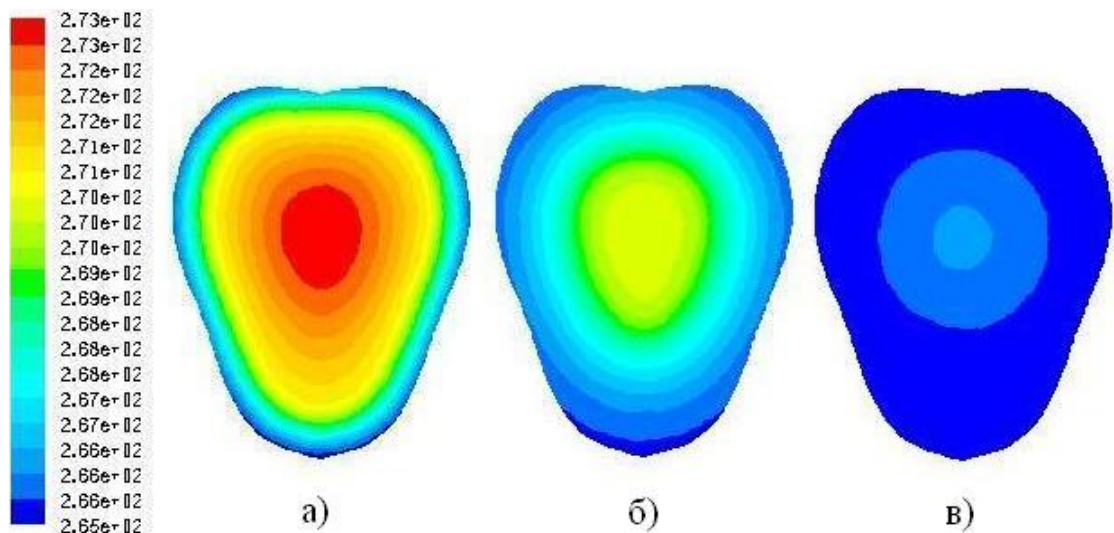


Рис. 6. Поле температури в ягоді клубники в різні моменти часу τ , с:
а) – 300; б) – 900; в) – 1500

Аналіз результатів розрахунку показав, що відмінність в тривалості охолодження та заморожування (від 20°C до мінус 20°C) для сферичної ягоди діаметром 18 мм і еліпсоїдної з осями $7\times 7\times 14,9$ мм складає 8%. В незакристалізованій частині продукту відмінність по температурах в центрі ягоди в однакові моменти часу не перевищує 2 К, в закристалізованій – 4 К.

CFD-моделювання разом з незаперечною перевагою можливості розрахунку довільної геометрії, отримання полів температури та ТФХ не дає можливості на даному етапі розглядати вплив дифузії розчинених речовин на процес заморожування та ступінь збереження властивостей початкового продукту.

У третьому розділі «Експериментальне дослідження процесу заморожування ягід в холодній аеродинамічній трубі» представлено обґрунтування параметрів, розробку і опис установки (холодної аеродинамічної труби) для заморожування окремих продуктів або їх невеликої кількості (рис. 7). Наведено результати експериментального дослідження процесу заморожування ягід, показано вплив наявності термопар в продукті.

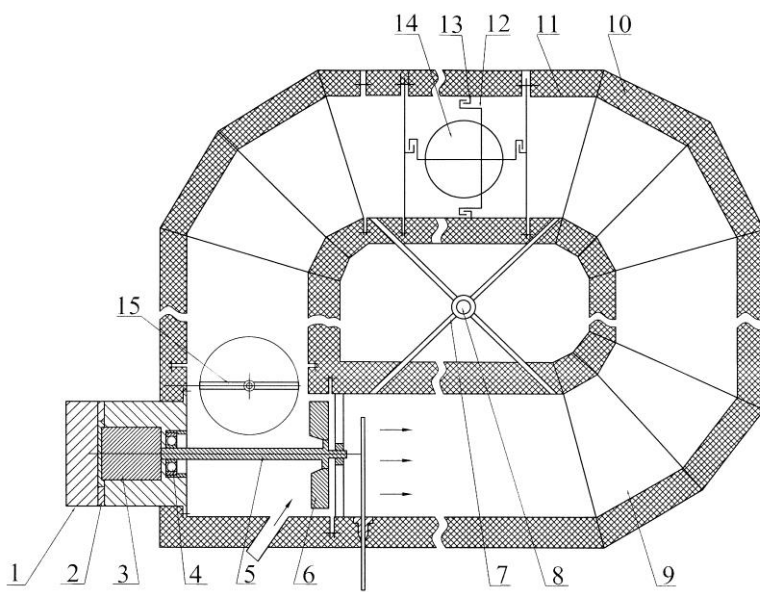


Рис. 7. Схема холодної аеродинамічної труби:

1 – теплоізоляційний кожух; 2 – фланець кріплення електродвигуна; 3 – електродвигун; 4 – підшипник кочення; 5 – вал вентилятора; 6 – крильчатка вентилятора; 7 – втулка; 8 – вісь обертання труби; 9 – поворотна ділянка каналу; 10 – теплоізоляційний матеріал; 11 – труба квадратного перерізу; 12 – лоток для продукту; 13 – направляючі; 14 – вікно спостереження; 15 – поворотна заслінка

Температурне поле поблизу продукту визначалося за допомогою гребінок термопар, розміщених до і після лотка по потоку. Швидкість потоку реєструвалася термоанемометром, встановленим в поворотній ділянці. Температура в ядрі продукту вимірювалася за допомогою термопар. Витрата рідкого азоту визначалася ваговим методом.

При визначенні температури в ядрі ягоди робочий спай термопар розташовувався в центрі продукту. При цьому провідники термопар теж знаходилися в холодному середовищі. Дослідження впливу наявності термопар в товщі ягоди на її температурне поле при заморожуванні проводилося розрахунковим шляхом за допомогою розробленої математичної моделі, а також CFD-моделювання. Результати показали, що діаметр спаю 1 мм (близько 0,06 розміру ягоди) та

менше не суттєво впливає на температурне поле усередині ягоди діаметром 18 мм при заморожуванні її в потоці газу зі швидкістю 3,8 м/с та температурі мінус 40°C. Похибка в цьому випадку не перевищує 1 К. У випадку застосування термопар діаметром 2,4 мм похибка може складати більше 2 К.

У четвертому розділі «Дослідження процесу заморожування ягід в швидкоморозильному тунельному апараті та промислових холодильних камерах» представлено розробку устаткування (ШТА) для промислового заморожування ягід в лотках (рис. 8), результати до-

слідів по заморожуванню чорної смородини, малини та вишні, вплив режимів заморожування на ступінь збереження масової частки води, вітаміну С і антоціанових барвних речовин у вказаних ягодах після розморожування, дослідження впливу елементів геометрії промислових холодильних камер на ефективність заморожування, чисельне дослідження поля температури і швидкості газу в холодильних камерах.

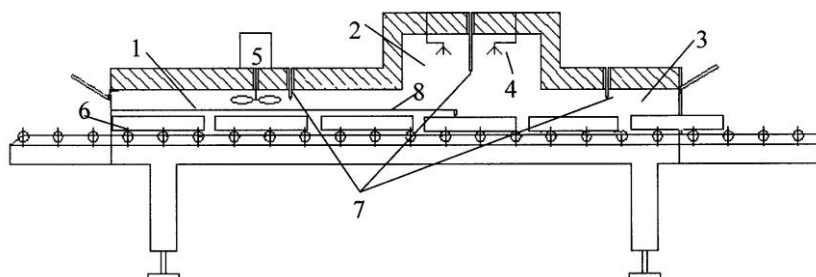


Рис. 8. Схема швидкозаморозильного тунельного апарату: 1 – секція попереднього охолодження; 2 – секція заморожування; 3 – секція вирівнювання температури; 4 – блок форсунок для подавання рідкого азоту; 5 – вентилятор; 6 – лотки із замороженим продуктом; 7 – нерухомі терморпари; 8 – рухомі терморпари

В результаті експериментів на різних режимах заморожування було виділено два основних: «нижній» та «верхній» (рис. 9).

Після заморожування продукт візуально оглядався, у тому числі і розрізався. Погіршення зовнішнього вигляду і порушення цілісності продукту після розморожування не спостерігалося. Було відсутнє злипання ягід, зберігалися первинний колір, аромат і консистенція.

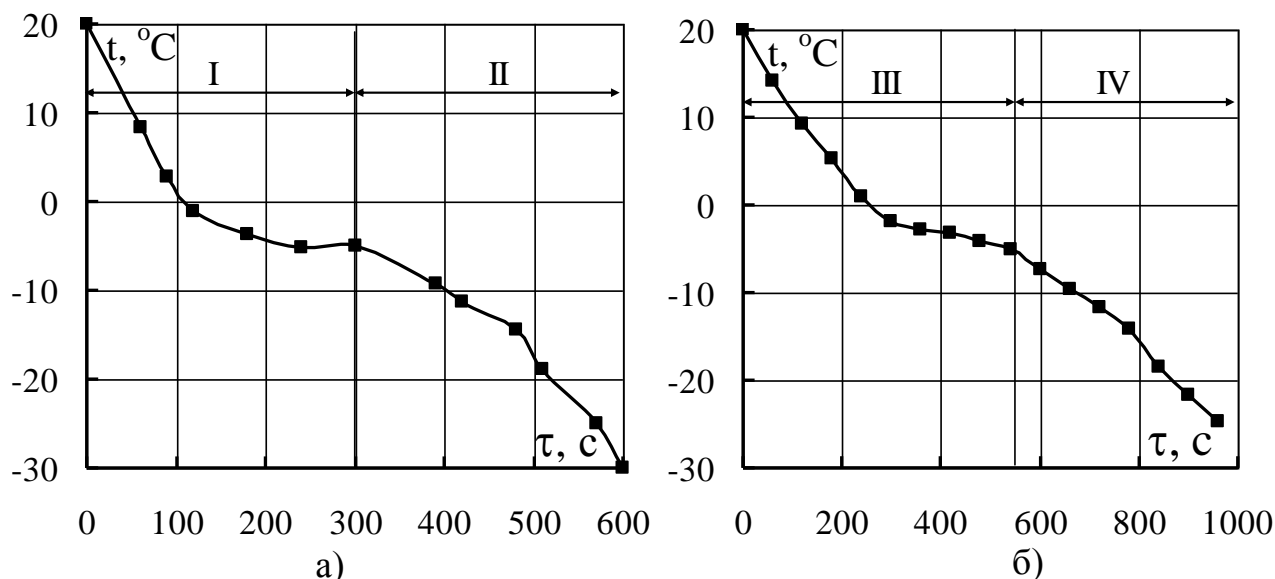


Рис. 9. Динаміка температури в чорній смородині: а) – «нижній» температурний режим; б) – «верхній» температурний режим; температура потоку в тунелі: I – мінус 35°C; II – мінус 85°C; III – мінус 20°C; IV – мінус 65°C

Заморожені зразки відправлялися в лабораторію для дослідження вмісту масової частки води, вітаміну С і антоціанових барвних речовин. Дослідження проводилися за сертифікованими методиками і критеріями, прийнятими в міжнародній практиці.

Результати показали, що при заморожуванні ягід вітамін С і барвні речовини не тільки

повністю зберігались, але й більш повно виділялись із тканин та клітин. В цьому аспекті кращим був «верхній» режим. Він характеризувався середньою температурою газу в камері попереднього охолодження мінус 20°C, камері заморожування – мінус 65°C, коефіцієнтами тепловіддачі 9...14 і 25...36 Вт/(м²·К), швидкістю потоку 0,3...0,5 і 1,1...1,7 м/с відповідно. Так, для чорної смородини «добавка» вітаміну С для «нижнього» режиму склала 17%, для «верхнього» – 42%, барвних речовин 17% і 41% відповідно.

Було проведено експериментальне і чисельне дослідження впливу геометрії низькотемпературних стаціонарних холодильних камер на ефективність заморожування великих партій ягід. Розглянуто вплив повітряних відбійників, потужності повітроохолоджувача, «проникненості» піддону, розкручування потоку на виході з повітроохолоджувача, кількості лотків, наявності «фальш-стелі» та направляючої пластини. Чисельні дослідження проводилися за допомогою CFD-моделювання. Розрахунки представлені у вигляді полів (рис. 10) та векторів швидкості, узагальнюючих таблиць та графіків для різних варіантів холодильних камер. Результати розрахунків порівнювалися з експериментальними даними.

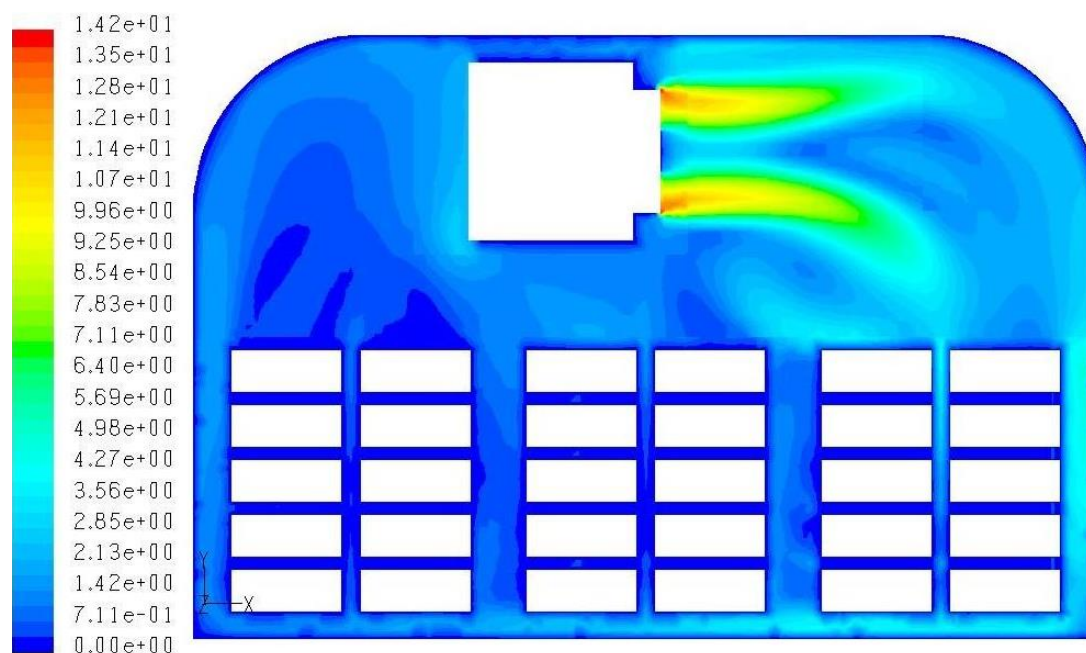


Рис. 11. Поле швидкості в камері з трьома рядами стелажів

На підставі отриманих результатів було визначено найбільш вдалий варіант геометрії камери із розглянутих. Основним критерієм порівняння виступала швидкість руху охолоджуючого газу між лотками.

У п'ятому розділі «Практичне впровадження результатів досліджень» розраховано основні економіко-експлуатаційні показники ШТА, зроблено його порівняння з подібним азотним тунелем АСТА-30. Розроблено схему утилізації холодоресурсу рідкого азоту, що дозволяє зменшити його витрату на 15%. Приведені вимоги до технологічних регламентів заморожування ягід чорної смородини, малини і вишні, схема технологічної лінії виробництва заморожених ягід. Представлено ізотермічні камери для зберігання заморожених продуктів та попереднього їх охолодження, рекомендації по конструктивному доопрацюванню проми-

слової холодильної камери з різними варіантами геометрії, криогенний програмний заморозувач для заморожування, як рідких, так і твердих харчових продуктів.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз науково-технічної літератури показав, що одним з найефективніших способів консервування ягід є їх швидке заморожування в потоці газу, а застосування тут азотних криогенних технологій дозволяє найповніше використовувати холодоресурс газу, забезпечуючи максимальне збереження властивостей початкового продукту. Проте низький рівень досліджень процесів швидкого заморожування, як в частині розрахунків, так і в частині апаратного оформлення, не дає можливості повністю реалізувати переваги азотних криогенних технологій.

2. В рамках моделі заморожування з рухомими межами розділу фаз з урахуванням теплопереносу, температурної залежності ТФХ, температури початку кристалізації рідкої фази ягоди враховано процеси дифузії розчинених речовин, отримано їх поля концентрації та поля температури в ягоді при заморожуванні. Достовірність моделі підтверджена при зіставленні результатів чисельного дослідження з експериментальними, а також з даними інших авторів.

3. Проведено чисельне моделювання процесу заморожування ягід, внаслідок чого встановлено зв'язок між параметрами газового потоку і параметрами ягоди.

4. Виконано експериментальне дослідження процесу заморожування ягід в потоці газу і показано вплив режимів заморожування на збереження масової частки вологи, вітаміну С і антоціанових барвних речовин. При заморожуванні ягід на лотках кращим був режим заморожування, що характеризується середньою температурою газу в камері попереднього охолодження мінус 20°C, камері заморожування – мінус 65°C, коефіцієнтами тепловіддачі 9...14 і 25...36 Вт/(м²·К), швидкістю потоку 0,3...0,5 і 1,1...1,7 м/с відповідно.

5. Визначено вплив відмінності форми ягоди від сфери при швидкому заморожуванні на тривалість процесу і температурне поле в ягоді. Відмінність в тривалості охолодження та заморожування (від 20°C до мінус 20°C) для сферичної ягоди діаметром 18 мм і еліпсоїдної з осями 7×7×14,9 мм склало 8%. В незакристалізованій частині продукту відмінність по температурах в центрі ягоди в однакові моменти часу не перевищує 2 К, в закристалізованій – 4 К.

6. Показано вплив наявності термопари в товщі ягоди на її температурне поле при заморожуванні. Для ягоди діаметром 18 мм при заморожуванні її в потоці газу із швидкістю 3,8 м/с і температурі мінус 40°C наявність термопари, діаметр спаю якої не перевищує 1 мм, не суттєво впливає на температурне поле усередині ягоди. Похибка в цьому випадку не перевищує 1 К. У разі застосування термопари 2,4 мм похибка може скласти більше 2 К.

7. Розрахунки полів температури в швидкоморозильному тунельному апараті і швидкості потоку газу в промислових низькотемпературних холодильних камерах дозволили визначити раціональні режими заморожування ягід, обґрунтувати параметри потоку газу, що

забезпечують раціональне використання його холодоресурсу.

8. Апробація методики розрахунку процесу заморожування ягід успішно проведена на таких установках, як холодна аеродинамічна труба, швидкоморозильний тунельний апарат та кріогенний програмний заморожувач.

9. Розроблено техніко-технологічні рекомендації щодо проведення процесів заморожування ягід в швидкоморозильному тунельному апараті. Представлено вимоги до технологічних регламентів і схему технологічної лінії заморожування ягід чорної смородини, малини і вишні.

10. Розроблено рекомендації по конструктивному доопрацюванню стаціонарних низькотемпературних холодильних камер, в яких відображено вплив повітряних відбійників, потужності повітроохолоджувача, «проникненості» піддону, розкручування потоку на виході з повітроохолоджувача, кількості лотків, наявності «фальш-стелі» і направляючої пластини.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лисица А. Ю. Теплотехнические аспекты энергосбережения и сохранения качества плодоовощной продукции при быстром замораживании / А. Ю. Лисица, И. И. Петухов, В. Н. Сырый // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 29, № 1. – С. 73–78. Здобувачем проведено експериментальні дослідження, виконано обробку їх результатів та підготовлено до друку статтю.

2. Численное исследование параметров охлаждающей среды в скороморозильном туннеле / И. И. Петухов, М. Л. Угрюмов, Ю. А. Скоб [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007.– №1 (37). – С. 25–28. Здобувачем сформовано початкові дані для розрахунку поля температури в швидкоморозильному тунельному апараті, виконано розрахунок та підготовлено матеріали до друку.

3. Петухов И. И. Моделирование процесса замораживания ягод / И. И. Петухов, В. Н. Сырый, А. Ю. Лисица // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование : Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» / НТУ «ХПИ». – Харьков, 2007. – Вып. 2. – С. 179–186. Здобувачем розраховано динаміку температури та концентрації розчинених речовин в ягоді при її заморожуванні, виконано обробку чисельних даних, оформлено результати дослідження та підготовлено матеріали до друку.

4. Гамуля Г. Д. Новое в технологии замораживания ягод с применением газообразного азота в скороморозильном туннельном аппарате / Г. Д. Гамуля, Р. Ю. Павлюк, Т. В. Крячко [и др.] // Научные труды ОНАХТ : сб. науч. трудов / Одесская нац. акад. пищ. техн. – Одесса, 2008. – Вып. 33. – С. 85–89. Здобувачем проведено експериментальні дослідження процесів заморожування в швидкоморозильному тунельному апараті, визначено параметри потоку та продукту, опрацьовано ці результати.

5. Петухов И. И. Исследование процесса замораживания ягод / И. И. Петухов, В. Н. Сырый, А. Ю. Лисица // Холодильная техника и технология. – 2008. – №3 (113). – С. 67–71. Здобувачем проведено експерименти та виконано обробку результатів, чисельно досліджено

процеси дифузії розчинених речовин, порівняно експериментальні та чисельні результати, підготовлено до друку статтю.

6. Петухов И. И. Экспериментальная установка для исследования процесса замораживания ягод / И. И. Петухов, В. Н. Сырый, А. Ю. Лисица // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении. ИКТМ'2004 : міжнар. наук.-техн. конф., 16–18 жовт. 2004 р. : тези доп. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Харків, 2004. – С. 99. Здобувачем проведено експериментальні роботи та підготовлено матеріали до друку.

7. Петухов И. И. Исследование нестационарного процесса замораживания ягод и фруктов в потоке хладагента / И. И. Петухов, А. Ю. Лисица // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении. ИКТМ'2005 : міжнар. наук.-техн. конф., 22–25 лист. 2005 р. : тези доп. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Харків, 2005. – С. 124. Здобувачем проведено експериментальні та чисельні дослідження нестационарного процесу заморожування ягід та фруктів в потоці газу, підготовлено матеріали до друку.

8. Лисица А. Ю. Математическая модель замораживания ягод и фруктов / А. Ю. Лисица, И. И. Петухов // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении. ИКТМ'2006 : міжнар. наук.-техн. конф. 14–17 лист. 2006 р. : тези доп. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Харків, 2006. – С. 119. Здобувачем виконано чисельне дослідження процесів заморожування ягід та підготовлено матеріали до друку.

9. Лисица А. Ю. Расчет газопузырькового потока в криволинейном канале / А. Ю. Лисица, С. А. Михайленко, И. И. Петухов // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении. ИКТМ'2006 : міжнар. наук.-техн. конф., 14–17 лист. 2006 р. : тези доп. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Харків, 2006. – С. 118. Здобувачем обґрунтовано припущення для моделі розрахунку параметрів газорідного потоку, виконано розрахунки по моделі та розглянуто вплив геометрії каналу на параметри потоку.

10. Лисица А. Ю. Влияние концентрации растворенных веществ в ягодах на процесс их замораживания / А. Ю. Лисица // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении. ИКТМ'2007 : міжнар. наук.-техн. конф., 13–16 лист. 2007 р. : тези доп. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Харків, 2007. – С. 142.

11. Петухов И. И. Исследование процесса замораживания ягод как подготовка к сублимационной сушке / И. И. Петухов, А. Ю. Лисица // Проблемы энергоефективности та якості в процесах сушіння харчової сировини : всеукраїнська наук.-практ. конф., 31 жовт. 2008 р. : тези доп. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. – Харків, 2008. – С. 36. Здобувачем досліджено та розглянуто питання зв'язку сублимаційного сушіння з процесами заморожування, підготовлено матеріали до друку.

12. Лисица А. Ю. Влияние диаметра спая термопары на результаты измерений в ядре замораживаемого продукта / А. Ю. Лисица // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении. ИКТМ'2009 : міжнар. наук.-техн. конф., 15–18 груд. 2009 р. : тези доп. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Харків, 2009. – С. 50.

13. Лисица О. Ю. Теплофізичні аспекти технології заморожування ягід з використанням газоподібного азоту / О. Ю. Лисица // Новітні технології оздоровчих продуктів харчу-

вання XXI століття. : міжнар. наук.-практ., конф. 21 жовт. 2010 р. : тези доп. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. – Харків, 2010. – С. 61–62.

14. Лисица А. Ю. Повышение эффективности промышленных холодильных камер за счет рационального потокораспределения / А. Ю. Лисица // Сучасні проблеми техніки та технології харчових виробництв, ресторанного бізнесу та торгівлі : всеукр. наук.-практ. конф., 18 лист. 2010 р. : тези доп. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. – Харків, 2010. – С. 197–199.

АНОТАЦІЯ

Лисица О.Ю. Удосконалення процесу швидкого заморожування ягід в потоці газу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківський державний університет харчування та торгівлі, Харків, 2011.

Дисертацію присвячено удосконаленню процесу швидкого заморожування ягід в потоці газу шляхом доробки розрахункової моделі, обладнання для швидкого заморожування та визначення технологічних режимів, що забезпечують якнайповніше збереження початкових властивостей продукту і зниження енерговитрат.

Запропоновані фізична і математична моделі заморожування ягоди з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик, впливу дифузії розчинених речовин на процес заморожування, зміни температури початку кристалізації рідкої фази тканинного соку при заморожуванні. Для експериментального дослідження процесу заморожування ягід в газовому середовищі була розроблена холодна аеродинамічна труба та швидкоморозильний тунельний апарат, для якого визначені раціональні режими заморожування ягід чорної смородини, малини та вишні.

Чисельні дослідження проводилися за допомогою розробленої моделі та CFD-моделювання. Розраховувалися поля температур в ягоді і газовому середовищі, а також поля швидкостей в промисловій холодильній камері з різними варіантами геометрії та кількістю лотків з продукцією. Приведені дані по практичному впровадженню результатів дослідження.

Ключові слова: швидке заморожування, дифузія розчинених речовин, кристалізація, поле температури, поле швидкості, швидкоморозильний тунельний апарат.

АННОТАЦІЯ

Лисица А.Ю. Совершенствование процесса быстрого замораживания ягод в потоке газа. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Харьковский государственный университет питания и торговли. Харьков, 2011.

Диссертация посвящена совершенствованию процесса быстрого замораживания ягод в потоке газа путем доработки расчетной модели, оборудования для быстрого замораживания и определения технологических режимов, которые обеспечивают наиболее полное сохранение исходных свойств продукта и снижение энергозатрат.

Проведенный анализ литературы показал, что быстрое замораживание в потоке газа, как лучший способ консервирования пищевых продуктов, позволяет максимально сохранить витаминный состав, вкусовые и питательные свойства, внешний вид исходного сырья. Применение здесь криогенных азотных технологий позволяет обеспечить не только снижение температуры и рост скорости замораживания, но и замедлить окислительные и ферментативные процессы. Для повышения эффективности установок необходимо максимально использовать хладоресурс азота, что требует достоверных данных о поле скорости и температуры потока газа в установках.

Предложены физическая и математическая модели замораживания ягоды с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик, влияния диффузии растворенных веществ на процесс замораживания, изменения температуры начала кристаллизации жидкой фазы тканевого сока при замораживании. Проведена апробация модели и многовариантные расчеты режимов замораживания ягод.

Для экспериментального исследования процесса замораживания ягод в газовой среде была разработана холодная аэродинамическая труба. Проведены эксперименты, выполнена идентификация показаний термопары в ядре ягоды при быстром замораживании и произведен учет наличия термопары в толще продукта при его замораживании.

Для исследования процессов замораживания ягод в лотках был разработан и изготовлен скороморозильный туннельный аппарат. Для ягод черной смородины, малины и вишни определены технологические режимы, обеспечивающие наиболее полное сохранение исходных свойств продукта и снижение энергозатрат. Разработана схема утилизации хладоресурса азота.

Экспериментальные и численные исследования, проведенные с помощью разработанной модели, дополнены CFD-моделированием. Рассчитывались поля температуры и коэффициента эффективной теплопроводности в ягоде при ее замораживании, поле температур в скороморозильном туннельном аппарате, поле скорости в промышленной холодильной камере с разными вариантами геометрии и количеством лотков с продукцией.

Приведены данные по практическому внедрению результатов исследования. Рассчитаны основные экономико-эксплуатационные показатели скороморозильного туннельного ап-

парата. Представлены схема технологической линии и требования к технологическим регламентам замораживания черной смородины, малины и вишни. Разработаны изотермические камеры для хранения замороженных продуктов. Подготовлены рекомендации по конструктивной доработке промышленной холодильной камеры. Разработан криогенный программный замораживатель, используемый для замораживания жидких и твердых пищевых продуктов. Результаты диссертационной работы подтверждены актами внедрения.

Ключевые слова: быстрое замораживание, диффузия растворенных веществ, кристаллизация, поле температуры, поле скорости, скороморозильный туннельный аппарат.

ANNOTATION

Lisitsya O.Yu. Improvement of the berries fast freezing in the gas fluid process. – Manuscript.

Thesis for Candidate's degree by speciality 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries. – Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, Kharkiv, 2011.

Dissertation is devoted the improvement of process fast freezing of berries in the gas stream by the revision of calculation model, equipment for fast freezing and determination of the technological modes which provide the most complete preservation of initial properties product and power inputs reduction.

The presence of tissue juices, temperature dependence of thermo physical properties, influence of diffusion permeates on the process of freezing, change of temperature beginning crystallization liquid phase of tissue juice at freezing, influence of super cooling berry to beginning of crystallization were took into consideration in the physical and mathematical models of freezing berry. The cold wind-channel and fast freezing tunnel were developed for experimental research of process freezing berries in a gas medium.

Numeral researches were conducted by the developed model and by CFD calculations. The temperature fields in the berry and gas medium and the velocity field in industrial refrigeration chamber for different variants of the geometry and product trays amount were calculated. Practical introduction research results data were presented.

Keywords: fast freezing, diffusion of cut-in matters, crystallization, temperature field, velocity field, fast freezing tunnel.

Підписано до друку 11.04.2011 . Формат 60x90/16. Папір офс. Друк офс.
Обл.-вид. арк. 1,1 Ум.-друк. арк. 1,25. Тираж 100 прим. Замовл. № 164

Харківський державний університет харчування та торгівлі,
вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

ДОД ХДУХТ, вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051