

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ЛОМЕЙКО ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

УДК. 664.8.037: 621.86.067.2:621.565

**ТЕПЛОВОЛОГІСНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЗАМОРОЖУВАННІ
У ФЛЮЇДИЗАЦІЙНОМУ ШВИДКОМОРОЗИЛЬНОМУ
АПАРАТІ**

Спеціальність

05.05.14 – холодильна та криогенна техніка,
системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса - 2007

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Таврійській державній агротехнічній академії
Міністерства аграрної політики України

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент кафедри
гідравліки і теплотехніки
Таврійської державної агротехнічної академії
СТРУЧАЄВ Микола Іванович

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор кафедри
технічної термодинаміки
Одеської державної академії холоду
ДОРОШЕНКО Олександр Вікторович

доктор технічних наук, професор кафедри
процеси і апарати харчових виробництв та технології кон-
сервування
Національного університету харчових технологій
КУЛІНЧЕНКО Віталій Романович

Провідна установа: Одеська національна академія харчових технологій
Міністерства освіти і науки України

Захист дисертації відбудеться 22.01.2007 року о 11-30 годині в ауд.108 на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м.
Одеса, 65026, Україна

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ за адресою:
вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65026, Україна

Автореферат розісланий 21.12.2006 р.

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

Мілованов В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ефективним шляхом збереження продукції і скорочення її втрат, а, отже, збільшення обсягів виробництва продовольчих ресурсів, є розширення виробництва швидкозаморожених продуктів, напівфабрикатів і готових блюд за технологією швидкої або шокової заморозки. У порівнянні з іншими методами консервування харчових продуктів застосування холоду викликає мінімальні зміни їхньої живильної цінності, маси й органолептичних показників.

В умовах ринкової економіки в Україні доцільно переробляти рослинну продукцію безпосередньо на місцях її виробництва. Для заморожування плодів, овочів, ягід найбільш раціонально використовувати флюїдизаційні апарати. У той же час існуючі на сьогоднішній день флюїдизаційні апарати мають істотні енерговитрати, що стримує розвиток технології заморожування на сільськогосподарських переробних підприємствах.

Виходячи з вищевикладеного, актуальність теми полягає в тому, що для вирішення задач по зниженню енерговитрат флюїдизаційних апаратів необхідне створення машин та пристроїв, що працюють по енерго- і ресурсозберігаючим технологіям, і мають високий технічний рівень.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що склали основу дисертаційної роботи, виконувалися відповідно до програми №1 науково-дослідних робіт Таврійської державної агротехнічної академії на 2003-2008 роки “Розробка наукових основ систем технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України” (підпрограма 1.6. “Розробка наукових систем технологій і технічних засобів для переробки сільськогосподарської продукції” №ДР0102U000687) та у відповідності Указом Верховної Ради України №75/94-ВР від 1.07.94г, що затвердила “Закон України про енергозбереження”.

Мета і задачі досліджень. *Метою* досліджень є зниження енерговитрат флюїдизаційного швидкозаморозильного апарату на підставі дослідження тепловологісних процесів при заморожуванні плодової, овочевої, ягідної продукції. Для досягнення поставленої мети визначені наступні *задачі*:

1. провести аналіз існуючих шляхів зниження енерговитрат холодильних установок в швидкозаморозильних апаратах і обґрунтувати перспективний напрямок вдосконалення параметрів і режимів флюїдизаційного апарату;

2. обґрунтувати вплив вологовмісту продукту на режими псевдозрідження у флюїдизаційному апараті;

3. обґрунтувати вплив тепловологісних процесів на тривалість заморожування плодової, овочевої, ягідної продукції у флюїдизаційному апараті;

4. обґрунтувати вплив тепловологісних характеристик атмосферного повітря на енергетичні показники флюїдизаційного швидкозаморозильного апарату при завантаженні продукції;

5. розробити механічний спосіб дії на термодинамічний процес зміни стану вологого повітря при заморожуванні;

6. провести порівняльну оцінку флюїдизаційних швидкоморозильних апаратів з метою виявлення перспективності механічного способу дії на термодинамічний процес;

7. дати економічне обґрунтування ефективності роботи удосконаленого флюїдизаційного апарату і розробити практичні рекомендації по зниженню енерговитрат даних апаратів малої продуктивності за рахунок використання запропонованого механічного способу.

Об'єктом дослідження є тепловологісний процес у флюїдизаційному швидкоморозильному апараті при заморожуванні плодової, овочевої і ягідної продукції.

Предметом дослідження є залежності енергетичних показників флюїдизаційного апарату від тепловологісних характеристик процесу заморожування плодової, овочевої, ягідної продукції.

Методи дослідження. Поставлені задачі вирішувалися з використанням традиційних і сучасних теоретичних методів дослідження, що дозволили досягти основних результатів дисертаційної роботи і підтвердити їхню вірогідність. Для аналітичного моделювання процесу завантаження швидкоморозильного апарату використовувалася комп'ютерна система MATLAB версії 6.0. При проведенні теоретичних досліджень тепловологісних процесів при заморожуванні в флюїдизаційному швидкоморозильному апараті використовувалися методи диференціального й інтегрального числення, основні положення теоретичної механіки і термодинаміки, аналітичної геометрії, комп'ютерної технології.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням активних експериментів, результати яких оброблялися методами математичного планування експериментів і математичної статистики. Статистична обробка результатів експериментальних досліджень проводилася за допомогою IBM-сумісних ПК з використанням табличного процесора Excel.

В дисертації захищаються **наукові положення:**

1. Вологовміст дрібних та подрібнених плодів, овочів та ягід визначає порізність і оптимальні режими їх заморожування у псевдозрідженому шарі; величина оптимальної швидкості потоку повітря у апараті є функцією змінною у часі, при цьому має екстремум на початку процесу і зменшується у кінці заморожування продукції, що забезпечує можливість розробки енергозберігаючого режиму роботи флюїдизаційного апарату.

2. Вплив запропонованим механічним способом на термодинамічний процес зміни стану атмосферного повітря, що потрапляє у морозильну камеру при завантаженні продукції, зменшує інеєутворення на поверхні повітряохолоджувача і знижує енергетичні витрати швидкоморозильного апарату.

Наукова новизна визначається наступними результатами досліджень тепловологісного процесу при заморожуванні плодової, овочевої, ягідної продукції у флюїди-

заційному швидкоморозильному апараті:

1. аналітично обґрунтовано і експериментально підтверджено вплив вологовмісту рослинної продукції на режими і енерговитрати процесу заморожування в псевдозрідженому шарі;

2. розроблена методика для визначення витрат енергії на виморожування вологи з атмосферного повітря;

3. розроблена методика для визначення додаткового інеєутворення на поверхні повітряохолоджувача в залежності від тепловологісних характеристик атмосферного повітря;

4. застосовано сумісний вплив теплової, фазової і механічної дії на термодинамічний процес зміни стану вологого повітря у апараті;

5. отримано подальший розвиток у галузі використання механічних пластичато-роторних вакуумних насосів і об'ємних живильників на основі розробки конструкції живильника-насоса для завантаження продукції у флюїдизаційний апарат малої продуктивності з одночасним відкачуванням атмосферного повітря (Пат.№48698 А);

6. отримано аналітичні залежності для визначення параметрів і режимів роботи пристрою для реалізації механічного способу дії на термодинамічний процес зміни стану вологого повітря у апараті;

7. визначені параметри і режими роботи удосконаленого апарату, які забезпечують більш високі його техніко-економічні показники.

Практичне значення одержаних результатів полягає у вдосконаленні режимів заморожування в псевдозрідженому шарі плодової, овочевої, ягідної продукції, що дозволило розробити рекомендації по зниженню енерговитрат флюїдизаційних швидкоморозильних апаратів малої продуктивності.

Результати науково-дослідної роботи по зниженню енерговитрат флюїдизаційного апарату малої продуктивності впроваджені у сільськогосподарських підприємствах Південного регіону України: сільськогосподарському товаристві з обмеженою відповідальністю „Краса Херсонщини” Каховського району Херсонської області та Мелітопольській державній сортодослідній станції Запорізької області.

Науково-технічна документація і рекомендації по зменшенню енерговитрат флюїдизаційного апарату малої продуктивності передані у ТОВ „Холодильна компанія” м. Мелітополя Запорізької області.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні і обґрунтуванні наукових положень дисертації, проведенні математичного моделювання процесу завантаження, одержанні аналітичних залежностей, проведенні експериментальних досліджень, публікації одержаних результатів, впровадженні результатів дисертаційної роботи у виробництво.

Апробація результатів дисертації. Основні положення результатів дисертаційної роботи доповідалися на науково-технічних конференціях: професорсь-

ко-викладацького складу та аспірантів Таврійської державної агротехнічної академії (1998-2006рр.); Міжнародному науковому конгресі молодих вчених і студентів “Здоров’я села – здоров’я держави” (Львів - Дубляни, 2000р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Землеробська механіка на рубежі сторіч” (Мелітополь, 2001р., 2006р.); 2-й Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми холодильної техніки і технології” (Одеса, 2002р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Актуальні проблеми технології та механізації процесів переробних та харчових підприємств” (Харків, 2002р.); науково-методичному семінарі кафедри “Процеси і апарати харчових виробництв та технології консервування” Національного університету харчових технологій (Київ, 2005р.).

Публікації. Основні матеріали і положення дисертації опубліковані в 12 наукових працях, з них 9 статей у фахових виданнях (6 без співавторів); тезах доповідей на наукових конференціях; отриманий 1 деклараційний патент Держдепартаменту України.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Повний об’єм дисертації 243 сторінки комп’ютерного тексту, на 182 з яких викладено основний зміст роботи, яка вміщує 49 рисунків, 6 таблиць, 18 додатків. Всього опрацьовано 190 найменувань літературних джерел.

Текст дисертації написано російською мовою.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, представлена наукова проблема і концепція, відзначені наукові передумови і гіпотеза, сформульовані основні положення, які складають наукову новизну й практичне значення роботи.

У **першому розділі** розглянуто технологічні особливості заморожування продукції рослинництва для підготовки її до довгострокового зберігання, визначені технологічні вимоги до рослинної сировини та замороженої продукції, проведено аналіз існуючих засобів для заморожування продукції і оцінено шляхи зниження енерговитрат швидкокомрозильних апаратів, проведений огляд і аналіз теоретичних і експериментальних досліджень процесу завантаження продукції у флюїдизаційний апарат - все це дозволило зробити висновки і пропозиції, а також визначити мету і задачі досліджень.

Наукові основи засобів механізації заморожування овочевої, плодової та ягідної продукції розроблені вітчизняними вченими Д.А. Христуло, Д.Г., Ботовим, Г.Б. Чижовим, Н.А. Головкіним, І.Г. Чумаком, а також іноземними дослідниками - Р. Планком, Т. Лорентцем. Ці та інші вчені заклали основні принципи технологічних розрахунків для створення ефективних технічних засобів механізації при обробці холодом.

Дослідженнями процесів у флюїдизаційних апаратах, в тому числі розробці ре-

жимів для заморожування плодової, овочевої, ягідної продукції, займалися А. Фікіїн, А.М. Войтко, К.П. Венгер, В.П. Чепурненко, Ю.А. Мирончук і інші вчені. Але відомі теоретичні розробки недостатньо висвітлюють фактори, що впливають на додаткові енерговитрати флюїдизаційних апаратів. Вплив вологи атмосферного повітря, що проникає в морозильну камеру флюїдизаційного апарату при безперервній подачі продукції через завантажувальні вікна, не враховано. Враховуючи, що маса одиничного продукту в процесі заморожування змінюється (усушка), підтримка постійної швидкості флюїдизації не є оптимальним режимом всього процесу, а характерна тільки для початкового періоду псевдозрідження. Підтримання швидкості флюїдизації постійною протягом всього процесу приводить до додаткових витрат електроенергії, а при збільшенні часу заморожування продукту можливе досягнення критичної швидкості флюїдизації, при якій виникає винесення частинок продукту з шару, що суперечить умові псевдозрідження.

У другому розділі обґрунтовано вплив вологовмісту продукції на порізність, режими псевдозрідження та час заморожування, а також тепловологісних характеристик атмосферного повітря на енергетичні показники флюїдизаційного швидкоморозильного апарату при завантаженні продукції. Виконане аналітичне дослідження механічного способу дії на термодинамічний процес зміни стану вологого повітря при подачі продукції на заморожування.

Згідно з відомими даними, при розрахунку флюїдизаційного швидкоморозильного апарату заданої продуктивності необхідно визначити оптимальну швидкість повітря у вантажному відсіку апарату і тривалість заморожування.

Оптимальну швидкість руху повітря у вантажному відсіку флюїдизаційного апарату визначають в залежності від маси маса одиничного продукту, який заморожується. При цьому не враховано, що при заморожуванні у флюїдизаційному апараті частина вологи плодової, овочевої, ягідної продукції випаровується, отже маса одиничного продукту зменшується.

На основі теоретичних досліджень отримано диференціальне рівняння для визначення кількості води, що випаровується з продукції:

$$dg_{np} = 0,622 \cdot \frac{\alpha}{\mu \cdot C_p} \cdot \frac{p_{cm} \cdot \left(t_{xl} + \frac{(t_{kp} - t_{xl}) \cdot (1 - \delta)}{1 - (Bi - 1) \cdot \delta} \right) - \varphi_6 \cdot p_{нас} \cdot t_{xl}}{p} \times \quad (1)$$

$$\times S \cdot \frac{\varphi_{np} \cdot \omega_6 \cdot r_3 \cdot \rho_{np} \cdot R^2}{t_{kp} - t_{xl}} \left[\frac{1}{\lambda} + \left(\frac{1}{\alpha \cdot R} - \frac{1}{\lambda} \right) \cdot (1 - \delta) \right] \cdot (1 - \delta) d\delta,$$

де g_{np} - кількість випареної вологи з одиниці поверхні продукту, кг; $0,622$ - відношення газових сталих повітря та пара; α - коефіцієнт тепловіддач і, Вт/м²К; μ - коефіцієнт опору випаровуванню; C_p - теплоємність, кДж/кг К; p_{cm} - тиск біля стінки,

Па; φ_6 - відносна вологість повітря у морозильній камері, %; $p_{нас}$ - тиск насиченого вологого пару при заданій температурі, Па; S - площа поверхні тіла, м²; φ_{np} - вологовміст продукту %; ω_6 - частка вимороженої води при середній кінцевій температурі заморожування, частки; r_3 - питома теплота льодоутворення, кДж/кг; δ - безрозмірна товщина промерзлого шару; t_{xl} - температура заморожування, К; $t_{кр}$ - кріоскопічна температура, К; Bi - критерій Біо; p - тиск пароповітряної суміші, Па; ρ_{np} - щільність продукту, кг/м³; R - характерний розмір, м; λ - теплопровідність, Вт/м К; T - температура навколишнього середовища, К.

В результаті інтегрування чисельним методом диференціального рівняння (2) по δ в межах від 0 до u_{np} , отримано дійсне значення кількості випареної вологи з одиниці поверхні і встановлено залежність усушки продукту від його вологовмісту при заморожуванні в псевдозрідженому шарі флюїдизаційного апарату (рис.1).

Порізність псевдозрідженого розширеного шару також є величиною, залежною від вологовмісту продукту, величина якої змінюється в процесі заморожування дрібних або подрібнених плодів, овочів і ягід в псевдозрідженому шарі у флюїдизаційному швидкоморозильному апараті:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{2 \cdot m_o \cdot g \cdot H_m \cdot \rho_n \cdot (1 - \bar{g}_{np})}{L_l \cdot B_l \cdot w_{opt}^3 \cdot \rho_{np} \cdot \rho_v} \quad (2)$$

де ε_{mf} - порізність псевдозрідженого розширеного шару; m_o - маса шару продукту, що рухається, на початку псевдозрідженого заморожування, кг/с; g - прискорення вільного падіння, м/с²; H_m - висота щільного шару продукту, м; ρ_n - насипна щільність продукту, кг/м³; L_l - довжина стрічки транспортера апарату, м; B_l - ширина стрічки транспортера апарату, м; w_{opt} - оптимальна швидкість руху повітря у вантажному відсіку флюїдизаційного апарату, м/с; \bar{g}_{np} - відносна кількість випареної вологи з одиниці поверхні продукту, кг/кг.

Процес виморожування вологи з повітря у флюїдизаційному апараті досліджено із використанням $H-d$ діаграми Рамзина (рис.2).

При охолодженні ненасиченого повітря з постійним вологовмістом $d_{n1} = d_{n2}$ до лінії насичення $\varphi = 100\%$ процес зображується прямою 1-2. При цьому в точці 2 досягається температура точка роси. При подальшому зниженні температури повітря випадає волога в рідкій фазі, тобто з'являється туман і роса (точка 3). При цьому паровміст відповідно зменшується й характеризується точкою 3' на лінії насичення. Зв'язок між точками 3 й 3' визначається для них загальною температурою, тобто вони перебувають

на одній ізотермі. Масовий паровміст дорівнює d_{n3} , а волога в рідкій фазі $d_{жс3} = d_{n2} - d_{n3}$.

У точці 4 досягається температура 0°C (точніше $t_4 = +0^{\circ}\text{C}$), що зберігається незмінною до точки 5 ($t_5 = -0^{\circ}\text{C}$). На цьому інтервалі волога, що випала $d_{жс5} = d_5 - d_{n5}$ в рідку фазу, переходить у тверду - туман перетворюється в крижаний туман. При подальшому заморожуванні повітря - процес 5-6 - відбувається десублімація, тобто насичена пара переходить безпосередньо у тверду фазу - у крижаний туман й іней, що осідає на поверхні повітроохолоджувача флюїдизаційного апарата. У точці 6 паровміст дорівнює d_{n6} ; інша частина вологи, дорівнює $d_{m6} = d_1 - d_{n6}$, перебуває у твердому стані.

Однією з особливостей термодинамічного процесу зміни стану вологого повітря є те, що вона може відбуватися при впливі трьох зовнішніх дій: теплового, фазового і механічного. Враховуючи, що у флюїдизаційному швидкоморозильному апараті застосовується дія лише теплової і фазової дії, пропонується вперше використовувати сумісний вплив трьох факторів, тобто зменшити надходження вологого атмосферного повітря в апарат при завантаженні продукції механічною дією.

Для оцінки впливу вологого повітря на енергетичні показники флюїдизаційного апарату отримано аналітичну залежність, що характеризує додаткові витрати теплоти на виморожування вологи повітря, яке поступає в камеру заморожування разом з продукцією через завантажувальне вікно:

$$Q_{дон} = \frac{p_{атм} \cdot G_{вл} \cdot \mu_{воз}}{R\mu \cdot t_1} \cdot \left[h_2 - c_{св} \cdot t_1 + h_n \cdot 0,622 \cdot \frac{\varphi_{\epsilon 1}}{1 - \varphi_{\epsilon 1}} \right], \quad (3)$$

де $Q_{дон}$ - додаткові витрати теплоти для виморожування вологи атмосферного повітря, кДж/с; $p_{атм}$ - атмосферний тиск повітря, Па; $G_{вл}$ - кількість атмосферного повітря, що надходить разом з продукцією через завантажувальне вікно флюїдизаційного апарату, м³/с; $\mu_{воз}$ - мольна маса повітря, кг/кмоль; $R\mu$ - універсальна газова стала, Дж/кмоль К; t_1 - температура атмосферного повітря на вході в апарат, К; h_n - ентальпія водяного пару при заданій температурі повітря, кДж/кг; h_2 - ентальпія повітря на виході з апарату, кДж/кг; $c_{св}$ - теплоємність сухого повітря, кДж/кг К; $\varphi_{\epsilon 1}$ - відносна вологість повітря на вході в апарат, %.

З рівняння (3) можна зробити висновок, що змінними параметрами, що впливають на додаткові енергетичні витрати, є тепловологісна та кількісна характеристика атмосферного повітря, яке потрапляє у морозильну камеру швидкоморозильного апарату через вікно при завантаженні продукції.

В результаті виморожування вологи з атмосферного повітря у вигляді конденсату виділяється певна кількість води, яка осідає на поверхні охолоджувача повітря у вигляді інею і збільшує енергетичне навантаження на компресор холодильної установки апа-

рату:

$$G_{\text{конд}} = \frac{P_{\text{атм}} \cdot G_{\text{вл}} \cdot \mu_{\text{воз}} \cdot 0,622 \cdot \frac{\varphi_{\text{в1}}}{1 - \varphi_{\text{в1}}}}{R \mu \cdot t_1} \quad (4)$$

де $G_{\text{конд}}$ - кількість води, що виділилася у вигляді конденсату, кг/с.

Згідно експериментальним даним В.П. Буракова, А.В. Доїльцина, Г.И.Козинського і В.Г. Хазіахметова кількість повітря в залежності від розмірів завантажувального вікна флюїдизаційного апарату становить $G_{\text{вл}} = 20 \dots 25 \text{ кг} / \text{год} \cdot \text{м}^2$.

Таким чином, при температурі атмосферного повітря в період переробки плодової, овочевої і ягідної продукції, яка складає $t_1 = 20 \dots 40^\circ \text{C}$ та при його середній відносній вологості $\varphi_{\text{в1}} = 40\%$, додаткові енерговитрати теплоти дорівнюють $Q_{\text{дон}} = 9 \dots 24 \text{ кДж} / \text{с}$, при цьому кількість додаткового конденсату у морозильній камері флюїдизаційного апарату:

$$G_{\text{конд}} = (0,007 \dots 0,01) \cdot S_{\text{ок}}, \quad (5)$$

де $S_{\text{ок}}$ - площа завантажувального вікна флюїдизаційного апарату, м^2 .

На підставі отриманих формул (3),(4) і (5) і використовуючи комп'ютерну систему MATLAB R6, можна отримати точні значення додаткових енерговитрат флюїдизаційного апарату від температури і кількості вологого повітря, що поступає при завантаженні продукції, графічні зображення яких представлені на рис. 3-4.

Аналіз графічних залежностей (рис.3-4) дозволяє зробити висновок, що при характерних для періоду заморожування рослинної продукції температурах $20 \dots 40^\circ \text{C}$ і відносній вологості $\varphi_{\text{в1}} = 40\%$ в результаті проникнення атмосферного повітря разом з продуктом через завантажувальне вікно флюїдизаційного апарату, необхідна додаткова кількість теплоти на її виморожування $Q_{\text{дон}} = 9 \dots 24 \text{ кДж} / \text{с}$ і при цьому утворюється додаткова конденсована волога у кількості $0,007 \dots 0,01 \text{ кг} / \text{с}$, що осідає на поверхню повітряохолоджувача у вигляді снігової шуби і підвищує енерговитрати холодильної установки апарату.

На підставі цього зроблено висновок, що для зниження енерговитрат флюїдизаційного апарату і підвищення ефективності його роботи необхідно зменшити надходження атмосферного повітря разом з рослинною продукцією через завантажувальне вікно.

У **третьому розділі** розглянуто існуючі методики визначення й аналізу фізико-механічних властивостей рослинної сировини, розроблених агрофізичною лабораторією ВИСХОМ, зокрема, методики визначення розмірних та масових характеристик овочів, плодів і ягід, визначення твердості продукту, опору продукту ударному навантаженню, визначення коефіцієнту тертя продукту, а також визначення теплопровідності продукції.

Для проведення подальших досліджень обиралися районовані сорти овочів, пло-

дів і ягід для Південного регіону України, що рекомендуються до заморожування у флюїдизаційних апаратах: картопля сорту „Лорх” (ДСТ 28564-76), нарізана кубиками розмірами 10x10x10, плоди черешні сорту „Мелітопольська чорна” (ДСТ 21922-76), ягоди чорної смородини сорту „Голіаф” (ДСТ 24689-76).

Дослідження гідродинаміки процесу псевдозрідження плодової, овочевої і ягідної продукції проводилися на експериментальній установці (рис.5), що була розроблена автором на базі кафедри „Обладнання переробних та харчових виробництв” Таврійської агротехнічної академії.

Повітря охолоджувалося у повітряохолоджувачі 2 і вентилятором 3 подавався під сітку 12, на якій розміщувався заморожуваний продукт 11. Для запобігання виносу продукту у верхній частині камери також встановлена сітка 9. Перед вентилятором змонтований шибер 4, що регулює витрати повітря. На вході повітря до вентилятору розміщений наперед тарирований дросельний пристрій для вимірювання витрати повітря. Спостерігати за процесом псевдозрідження можна через виконану з органічного скла стіну камери 8. Опір шару і дросельного пристрою вимірювався U-видними дифманометрами 13. Висота шару продукту в камері змінювалася відповідно до рекомендацій по заморожуванню даного виду продукції.

Експериментальне значення фактичної швидкості повітря w в камері псевдозрідження визначається по формулі:

$$w = V / F, \quad (6)$$

де V - витрата повітря, м³/с;

F - площа поперечного перетину камери псевдозрідження, м².

Враховуючи отримані дані по кількості випареної вологи з одиниці поверхні з плодової, овочевої і ягідної продукції отримано залежності часу заморожування з урахування її вологовмісту (рис.6) і оптимальної швидкості повітря у вантажному відсіку у флюїдизаційному апараті (рис.7).

На підставі проведених експериментальних досліджень, згідно приведеної методики, були підтверджені теоретичні припущення про вплив вологовмісту продукту на режими псевдозрідження плодової, овочевої, ягідної продукції.

Таким чином, оптимальна швидкість повітря у вантажному відсіку флюїдизаційного апарату в залежності від вологовмісту продукції, враховуючи формулу (1), пропонується визначати по емпіричній формулі:

$$w_{opt} = 2,25 + 1,95 \cdot \lg(G'_{ed} - g_{np}), \quad (7)$$

де G'_{ed} - маса одиничного продукту до заморожування, кг.

У четвертому розділі обґрунтовано спосіб механічної дії на зміну стану вологого повітря у флюїдизаційному апараті при заморожуванні плодової, овочевої, ягідної продукції на підставі розробки конструкції живильника-насоса для зниження проникнення вологого атмосферного повітря через завантажувальне вікно апарату, що дозво-

ляє зменшити інеєутворення на поверхні повітряохолоджувача холодильної установки.

З метою реалізації механічного способу дії на стан вологого атмосферного повітря в результаті теоретичного аналізу існуючих конструкцій об'ємних дозаторів та вакуумних насосів було запропоновано конструкцію живильника-насосу для дозованої подачі плодів, овочів, ягід до флюїдизаційного швидкоморозильного апарату малої продуктивності з одночасною відкачкою атмосферного повітря. (Пат.№48698 А)

При подачі продукції у флюїдизаційний апарат живильником-насосом одночасно надходить вологе атмосферне повітря окремими порціями, тому сумарну відкачку повітря живильником-насосом можна розглядати як сумарний об'єм повітря, що відкачується окремими комірками в одиницю часу:

$$S_T = (C \cdot e_p \cdot R_I - F_0 \cdot z) \cdot n \cdot L_p, \quad (8)$$

де S_T - теоретична подача, м³/с; C - коефіцієнт, що враховує вплив числа лопотів, відносного ексцентриситету $\bar{\lambda}$ та фізико-механічних властивостей продукції; e_p - ексцентриситет ротора живильника-насоса, м; R_I - радіус корпусу живильника-насоса, м; F_0 - мінімальна площа комірки живильника-насоса, м², (на рис.8 відповідає площі 1"2"3"4"); z - число лопатей, шт.; n - частота обертання ротора, об/с; L_p - довжина ротора, м.

Теоретичні та експериментальні дослідження робочого процесу відкачки волого атмосферного повітря при подачі продукції до швидкоморозильного апарату по двом критеріям оптимізації "пошкоджуваності" продукції та "подача" живильника - насоса дозволили встановити його раціональні параметри і режими роботи.

Відношення раціональних параметрів подачі S_d живильника-насоса визначених експериментально до її теоретичних значень S_T (8) дозволило встановити раціональний коефіцієнт відкачки вологого атмосферного повітря з флюїдизаційного швидкоморозильного апарату малої продуктивності живильника - насоса $\lambda = 0,70 \dots 0,75$.

У п'ятому розділі проведено порівняльну оцінку і апробацію нового способу механічної дії на стан вологого повітря у флюїдизаційному апараті.

На базі розроблених моделей виконано комп'ютерне моделювання зміни стану вологого повітря продукції до флюїдизаційному апараті.

Обробка результатів досліджень в MATLAB R6 дозволила отримати рівняння, що встановлюють залежність потужності N від швидкості повітряного потоку w при постійній товщині шару d і температурі заморожування t :

$$\text{при } t_1=0,15\text{м, } t=-30^\circ\text{C} \quad N_{-30}^{\delta_1} = -0,18 \cdot w^3 + 6,6 \cdot w^2 - 30 \cdot w + 96; \quad (9)$$

$$\text{при } t_1=0,15\text{м, } t=-40^\circ\text{C} \quad N_{-40}^{\delta_1} = -0,31 \cdot w^3 + 8,3 \cdot w^2 - 42 \cdot w + 1,3 \exp(+0,002); \quad (10)$$

$$\text{при } t_2=0,30\text{м, } t=-30^\circ\text{C} \quad N_{-30}^{\delta_2} = -0,69 \cdot w^3 + 21 \cdot w^2 - 89 \cdot w + 2,2 \exp(+0,002); \quad (11)$$

$$\text{при } t_2=0,30\text{м, } t=-40^\circ\text{C } N_{-40}^{\delta_2} = -w^3 + 24 \cdot w^2 - 1,1 \exp(+0,002) \cdot w + 2,9 \exp(+0,002). \quad (12)$$

Встановлено залежність потужності від товщини заморожуваного шару при певній швидкості повітряного потоку і постійній температурі заморожування: для споживаної потужності апарату при $t=-30^\circ\text{C}$:

$$N_{-30}^{\delta} = 0,067 \cdot \delta^2 - 0,0067 \cdot \delta + 0,24; \quad (13)$$

для питомої витрати енергії апарату при $t=-30^\circ\text{C}$:

$$N_{\text{уд}-30}^{\delta} = 0,0028 \cdot \delta^2 - 0,045 \cdot \delta + 0,051; \quad (14)$$

В залежності від швидкості повітряного потоку споживна потужність агрегатів холодильної установки флюїдизаційного апарату (рис.9):

$$\text{для вентиляторів } N_B = 0,056 \cdot w^3 - 0,16 \cdot w^2 - 0,53 \cdot w + 6; \quad (15)$$

$$\text{для компресора } N_K = 0,13 \cdot w^3 - 1,4 \cdot w^2 - 8,4 \cdot w + 1,6 \exp(+0,002); \quad (16)$$

для сумарної потужності холодильної установки апарату

$$N = 0,15 \cdot w^3 - 0,99 \cdot w^2 - 11 \cdot w + 1,7 \exp(+0,002). \quad (17)$$

Проведення порівняльних випробувань трьох варіантів завантажувальних пристроїв флюїдизаційного апарату дало можливість оцінити роботу кожного з них. При збільшенні площі отвору відкритого завантажувального вікна апарату $S_{ок}$ в межах $0,1 \dots 1,2\text{м}^2$, кількість повітря, що поступило через вікно, зростає в 12 разів (на $27,5\text{кг/м}^2$).

В той же час вікно, прикрите поліетиленою завісою, дозволило понизити надходження повітря через вікно на 20% , а застосування живильника-насоса дозволило зменшити надходження повітря в апарат на 75% . При цьому додаткове споживання потужності зменшилося, відповідно, на $0,5\%$ і 3% від сумарної споживної потужності швидкозаморозильного апарату.

В результаті обробки результатів випробувань встановлена залежність додаткової споживаної потужності холодильної установки флюїдизаційного апарату малої продуктивності від площі його завантажувального вікна:

$$N = -1,5 \exp(-0,014) \cdot S_{ок}^5 + 2 \exp(-0,013) \cdot S_{ок}^4 - 1,9 \exp(-0,013) \cdot S_{ок}^3 + 72 \exp(-0,014) \cdot S_{ок}^2 + 25 \cdot S_{ок} + 8 \exp(-0,015). \quad (18)$$

Розрахунки техніко-економічних показників використання запропонованого способу механічної дії на процес зміни стану вологого повітря показали, що за рахунок зменшення надходження вологого атмосферного повітря до морозильної камери, енерговитрати процесу заморожування плодової, овочевої, ягідної продукції у флюїдизаційних апаратах малої продуктивності знижені на 3% . Встановлення оптимальних значень швидкості псевдозрідження та часу заморожування в залежності від вологовмісту продукту зменшить питому витрату електроенергії флюїдизаційного апарату до 8% . Завдяки економії енергетичних витрат за рахунок зменшення інєєутворення на

поверхні повітряохолоджувача досягається річний ефект у розмірі **25940грн.**, а строк окупності при цьому складає **0,1 року**. При врахуванні тепловологісного процесу у флюїдизаційного швидкокоморозильного апарату продуктивністю 800кг/год сумарний річний ефект складає до **187219 грн**, а по приведених витратах складає **112 грн** на одну тонну замороженої продукції.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень тепловологісних процесів флюїдизаційного швидкокоморозильного апарату можна зробити наступні висновки:

1. Для зниження енерговитрат флюїдизаційних швидкокоморозильних апаратів перспективним є врахування вологовмісту заморожуваної продукції (**75-85%**) і вологого атмосферного повітря, що поступає в морозильну камеру при завантаженні продукції.

2. Оптимальна швидкість повітря при заморожуванні в псевдозрідженому шарі не є постійною величиною і зменшується по мірі випаровування вологи з продукту.

3. При врахуванні вологовмісту і усушки продукту час заморожування плодової, овочевої, ягідної продукції у флюїдизаційному апараті зменшується до **10%**, що знижує питому витрату електроенергії флюїдизаційного апарату до **8%**.

4. Додаткові витрати теплоти флюїдизаційного швидкокоморозильного апарату на виморожування вологи повітря, що поступає в морозильну камеру при завантаженні продукції, залежать від тепловологісних характеристик атмосферного повітря: при $t=20...40^{\circ}\text{C}$ і $u_{\text{в1}}=40\%$ складають $Q_{\text{дон}}=9...24\text{кДж/с}$.

5. Запропонований спосіб, що полягає у сумісному впливі теплової, фазової і механічної дії на термодинамічний процес зміни стану вологого атмосферного повітря у флюїдизаційному апараті при заморожуванні плодової, овочевої, ягідної продукції, зменшує інеесутворення на поверхні повітряохолоджувача холодильної установки на **0,007...0,01кВт/с**.

6. Раціональні параметри запропонованого завантажувального пристрою флюїдизаційного апарату малої продуктивності дозволяють зменшити надходження вологого повітря в морозильну камеру на **75%**. Порівняльна оцінка удосконаленого швидкокоморозильного апарату показала, що енерговитрати холодильної установки при використуванні живильника-насоса знижені на **3%**.

7. При вдосконаленні тепловологісного процесу флюїдизаційного швидкокоморозильного апарату продуктивністю 800кг/год сумарний річний ефект складає до **187219 грн**, при використанні живильника-насоса для завантаження апарату **25940 грн**, а термін окупності запропонованої розробки складає **0,1 року**. Економічний ефект по приведених витратах складає **112 грн** на одну тонну замороженої продукції. Розроблені

практичні рекомендації по зниженню енерговитрат флюїдизаційних апаратів малої продуктивності.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ЗДОБУВАЧЕМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ломейко А.П. Исследование теплофизических характеристик плодоовощной продукции // Труды Таврической государственной агротехнической академии. – Мелитополь: ТГАТА. - 1998. – Вып.1, Т.6. – С.71-76.

2. Ломейко А.П. Исследования сорбционных процессов во флюидизационном морозильном аппарате при замораживании плодоовощной продукции //Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. – 1999. – Вип.1,Т.13. – С.46-49.

3. Ломейко О.П. Дослідження живильника флюїдизаційного апарату //Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. – 2000. – Вип.1,Т.14. – С.50-53.

4. Ломейко О.П., Сердюк М.Є. Обґрунтування оптимальної конструкції машини для заморожування плодоовочевої та ягідної продукції у сільському господарстві // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. – 2001. – Вип.1, Т.23. – С.79-83

Автору належить аналіз існуючих засобів механізації для заморожування овочевої, плодової і ягідної продукції та обґрунтування оптимальної конструкції машини.

5. Стручаєв М.І., Ломейко О.П. Живильник-насос для плодової та ягідної продукції // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ. – 2002. – Вип.9 – С.394-401.

Автору належить аналіз існуючих засобів механізації для завантаження овочевої, плодової і ягідної продукції та технічні рішення, що до розробки конструкції живильника-насоса.

6. Стручаєв М.І., Ломейко О.П. Методика розрахунку живильника-насосу для флюїдизаційного апарату при заморожуванні плодової та ягідної продукції //Збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції Одеської державної академії холоду. - Одеса: ОДАХ. - 2002 - С.118-122.

Автору належить отримання аналітичних залежностей параметрів живильника-насоса, з урахуванням властивостей овочевої, плодової і ягідної продукції.

7. Ломейко О.П. Експериментальні дослідження процесу відкачки повітря при дозованій подачі черешні живильником-насосом //Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь: ТДАТА. - 2003. – Вип.15. - С.76-83

8. Ломейко О.П. Обґрунтування процесу завантаження плодоовочевої, ягідної продукції і параметрів живильника-насоса флюїдизаційного апарату // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. - 2005. – Вип.25. – С.55-65.

9. Ломейко О.П. Рекомендації по зниженню втрат електроенергії флюїдизаційного апарату малої продуктивності // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь: ТДАТА. - 2005. - Вип.34. – С.121-125.

10. Пат.№48698 А Україна, МПК7, Україна, F25D25/00, F04C13/00. Живильник-насос для плодової або ягідної продукції. /В.А. Дідур, М.І. Стручаєв, О.П. Ломейко, К.М. Стручаєв (Україна). - №2001117728; Заявлено 12.11.2001; Опубл. 15.08.2002; Бюл.№8 – С.10.

Автору належить патентний пошук та теоретичне обґрунтування принципу роботи живильника-насоса та технічні рішення.

11. Ломейко О.П. Обґрунтування процесу завантаження плодоовочевої та ягідної продукції та параметрів живильника флюїдизаційного апарату // Тези Міжнародного наукового конгресу молодих вчених та студентів. – Львів - Дубляни: Львівський державний медичний університет ім. Галицького: ЛДАУ. - 2002 – С.56-57.

12. Стручаєв М.І., Ломейко О.П. Методика розрахунку живильника-насосу для флюїдизаційного апарату при заморожуванні плодової та ягідної продукції // Тези Міжнародної науково-технічної конференції Одеської державної академії холоду. - Одеса: ОДАХ. - 2002 - С.122-123.

Автору належить отримання аналітичних залежностей параметрів живильника-насоса, з урахуванням властивостей продукції.

АНОТАЦІЯ

Ломейко О.П. Тепловологісні процеси при заморожуванні у флюїдизаційному швидкоморозильному апараті. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 - холодильна та кріогенна техніка, системи кондиціонування - Одеська державна академія холоду, Одеса, 2007р.

Захищається дисертація, присвячена науковому обґрунтуванню впливу тепловологісних процесів при заморожуванні плодової, овочевої та ягідної продукції у псевдозрідженому стані на енергетичні показники флюїдизаційного швидкоморозильного апарату.

Обґрунтовано і експериментально підтверджено вплив тепловологісних процесів у флюїдизаційному апараті на режими заморожування в псевдозрідженому шарі. Розроблена методика для визначення витрат енергії на виморожування вологи з продукту і

атмосферного повітря при заморожуванні продукції у флюїдизаційному швидкоморозильному апараті.

Застосовано сумісний вплив теплової, фазової і механічної дії на зміну стану вологого повітря у флюїдизаційному апараті при заморожуванні плодової, овочевої, ягідної продукції на підставі розробки конструкції живильника-насоса для зниження проникнення вологого атмосферного повітря через завантажувальне вікно апарату. Запропонований спосіб зменшує інеєутворення на поверхні повітряохолоджувача холодильної установки.

Визначені параметри і режими роботи удосконаленого флюїдизаційного апарату, які забезпечують більш високі його техніко-економічні показники.

Розрахунки техніко-економічних показників використання запропонованого способу механічної дії на стан вологого повітря показали, що за рахунок зменшення надходження вологого атмосферного повітря до морозильної камери, енерговитрати процесу заморожування плодової, овочевої, ягідної продукції у флюїдизаційних апаратах малої продуктивності знижені на **3%**. Встановлення оптимальних значень швидкості псевдозрідження та часу заморожування в залежності від вологовмісту і усушки продукту зменшить питому витрату електроенергії флюїдизаційного апарату до **8%**.

Ключові слова: овочева, плодова та ягідна продукція, заморожування, тепловологісний процес, тепловологісні характеристики, вологовміст, флюїдизаційний апарат, псевдозрідження, живильник-насос, енерговитрати.

АННОТАЦІЯ

Ломейко А.П. Тепловлажностные процессы при замораживании в флюидизационном скороморозильном аппарате. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 - холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования - Одесская государственная академия холода, Одесса, 2007г.

Защищается диссертация, посвященная научному обоснованию влиянию тепловлажностных процессов при замораживании плодной, овощной и ягодной продукции в псевдоожигеном состоянии на энергетические показатели флюидизационного скороморозильного аппарата.

Обоснована актуальность темы, представлены научная проблема и концепция, отмечены научные предпосылки и гипотезы, сформулированы основные положения, которые составляют научную новизну и практическое значение работы.

Рассмотрены технологические особенности замораживания овощной, плодовой и ягодной продукции для подготовки ее к длительному хранению, определены критерии

оценки качества замораживания. Проведен анализ существующих скороморозильных аппаратов и путей снижения энергозатрат их холодильных установок. Установлено, что наиболее эффективным способом замораживания является быстрое замораживание в флюидизационных скороморозильных аппаратах. На основании обзора и анализа теоретических и экспериментальных исследований флюидизационных аппаратов доказано, что для снижения энергозатрат их холодильных установок необходимо учитывать влияние тепловлажностных процессов в флюидизационных аппаратах на время замораживания, режимы псевдооживления продукции и на приток влажного атмосферного воздуха через загрузочное окно аппарата.

Обосновано и экспериментально подтверждено влияние тепловлажностных процессов в флюидизационном аппарате на режимы замораживания в псевдооживленном слое. Разработана методика для определения расходов энергии на вымораживание влаги из продукта и атмосферного воздуха при замораживании продукции в флюидизационном скороморозильном аппарате. Получены аналитические зависимости дополнительных расходов теплоты флюидизационного скороморозильного аппарата на вымораживание влаги воздуха, проникающей в морозильную камеру при загрузке продукции, от тепловлажностных характеристик атмосферного воздуха: при температуре в сезон переработки плодовой, овощной и ягодной продукции $t=20...40^{\circ}\text{C}$ и средней относительной влажности $\mu_{в\ 1}=40\%$ дополнительный расход тепла составляет $Q_{дон}=9...24\text{кДж/с}$. При этом образуется дополнительно конденсируемая влага в количестве $0,007-0,01\text{кг/с}$, оседающая на поверхности воздухоохладителя в виде инея, что повышает энергозатраты холодильной установки флюидизационного скороморозильного аппарата.

Применено совместимое влияние теплового, фазового и механического воздействия на изменение состояния влажного воздуха в флюидизационном аппарате при замораживании плодовой, овощной, ягодной продукции на основании разработки конструкции питателя-насоса для снижения проникновения влажного атмосферного воздуха через загрузочное окно аппарата. Предложенный способ уменьшает инеобразование на поверхности воздухоохладителя холодильной установки.

Определены параметры и режимы работы совершенствованного флюидизационного аппарата, которые обеспечивают более высокие его технико-экономические показатели. Получены аналитические зависимости для расчета конструктивно-технологических параметров предложенного питателя-насоса от вида и физико-механических свойств продукции. На основании планирования многофакторного эксперимента выявлена степень влияния различных факторов на изменение состояния влажного атмосферного воздуха и обоснованы его рациональные параметры.

Расчеты технико-экономических показателей показали, что за счет использования механического способа воздействия на состояние влажного воздуха энергозатраты процесса замораживания уменьшились на 3%, а применение оптимальных скоростей псевдооживления и времени замораживания в зависимости от влагосодержания и усушки продукта позволяет снизить затраты электроэнергии флюидизационного аппарата до 8%.

Ключевые слова: овощная, плодовая и ягодная продукция, замораживание, тепловлажностный процесс, тепловлажностные характеристики, влагосодержание, флюидизационный аппарат, псевдооживление, питатель-насос, энергозатраты.

SUMMARY

The Lomeyco A.P. Warm-moisture processes at freezing at the flyoidization speedfreezing vehicle. – Manuscript.

The dissertation on gaining of scientific degree of candidate of technical sciences after specialty 05.05.14 – Refrigeration and criogenic techniques and Air Conditioning systems – Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 2007.

There is on the defensive the dissertation devoted to the scientific grounded influencing of warm-moisture process at freezing of fruit, vegetable and berry products in on the power indexes at the flyoidization speedfreezing vehicle.

The influencing of warm-moisture processes at the flyoidization speedfreezing vehicle on the modes of freezing in the seethes state are graunded and experimentally confirmed. The developed method for determination of charges of energy on freezing of moisture from a product and atmospheric air at freezing of products at the flyoidization speedfreezing vehicle.

Compatible influence of thermal, phase and mechanical action is applied on the change of the state of moist air in at the flyoidization speedfreezing vehicle at freezing of fruit, vegetable, berry products on the basis of development of construction of feeder-pump for the decline of penetration of moist atmospheric air through the load window of vehicle. The offered method diminishes hoarfrostmaking on the surface of airfreezing refrigeration vehicle.

Definite parameters and modes of operations of the improved at the flyoidization speed-freezing vehicle, which provide more high its tehnicо-economichni indexes.

Computations of tehnicо-economichnih indexes of the use of the offered method of mechanical action on the state of moist air showed that due to reduction of receipt of moist atmospheric air to the refrigerator chamber, energy expenditure of fruit, vegetable, berry products freezing process at the flyoidization speedfreezing vehicle of small productivity are lowered on 3%. Establishment of optimum values of speed of seethe state and time of freezing

depending on a moisture contents product will decrease the specific expenditure of electric power of flyoidization speedfreezing vehicle on 8%.

Key words: vegetable, fruit and berry products, freezing, warm-moisture processes, warm-moisture descriptions, moisture contents, flyoidization speedfreezing vehicle, seethe state, feeder-pump, energy expenditure.

Підписано до друку 19.12.2006.
Обсяг 0,9 авт. арк. Формат 60x90/16.
Тираж 100 прим. Зам. №

Надруковано у типографії
Таврійської державної агротехнічної академії
Адреса: 72312 м. Мелітополь, пр-т Б.Хмельницького, 18