

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТОМЧИК ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА

УДК 621.565.2

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОВИТРАТ
МАЛИХ ОХОЛОДЖУВАНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Спеціальність 05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступіня
кандидата технічних наук

Одеса – 2019

Дисертація є рукописом.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор,
Хмельнюк Михайло Георгійович,
Одеська національна академія харчових технологій
Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій
та екоенергетики ім. В. С. Мартиновського МОН
України, завідувач кафедри холодильних установок і
кондиціонування повітря

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор,
Нікульшин Володимир Русланович,
завідувач кафедри теоретичної, загальної і
нетрадиційної енергетики Одеського національного
політехнічного університету МОН України

кандидат технічних наук, доцент,
Мирончук Юрій Анатолійович
провідний науковий співробітник наукового центру
Житомирського військового інституту
ім. С. П. Корольова МО України

Захист дисертації відбудеться 4 липня 2019 р. о 11⁰⁰ годині в ауд. 108 на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 в Одеській національній академії
харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної
академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082,
Україна

Автореферат розісланий 1 червня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03,
доктор технічних наук, професор



В. І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Здійснення стратегії оптимального розвитку холодильного господарства на основі впровадження нових технологій і конструктивних рішень з метою підтримання якісних показників під час зберігання і транспортування охолоджених продуктів, є головним напрямком забезпечення вимог до підтримання на законодавчому рівні умов національної продовольчої і енергетичної безпеки.

Але, незважаючи на впровадження нових технологій і конструктивних рішень для їх здійснення, втрати сільськогосподарських продуктів і сировини залишаються на досить високому рівні в зв'язку з можливими порушеннями температурних параметрів у вантажному просторі, які періодично виникають в охолоджуваних камерах з будь-якими охолоджуючими системами і будівельно-ізоляційними конструкціями. Коливання температур повітря також впливають на витрати енергії при роботі холодильного обладнання.

Тому вдосконалення процесів зберігання і транспортування на основі розробки і застосування засобів для стабілізації температури продукту та зниження енерговитрат при роботі холодильного обладнання є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно до загального напрямку робіт Навчально-наукового інституту Холоду, кріотехнологій і екоенергетики ім. В. С. Мартиновського, у напрямку енергетики та енергоефективності, зокрема НДР МК-09/01а «Розробка методології енерготехнологічного моніторингу об'єктів холодильного господарства міжгалузевої структури зберігання продовольчих запасів України» (ДР № 0109U000409), НДР МК-14/03 «Розробка та створення дослідно-експериментального виморожуючого опріснювача. Дослідження та створення експериментального зразку обладнання для сублімаційного сушіння продуктів рослинного походження» (ДР № 0114U00075), НДР МК-12/01 «Наукові основи логістики дистанційного моніторингу та проектування охолоджуючих систем агропромислового комплексу України» (ДР № 0112U000728).

Мета і завдання досліджень. Метою даної роботи є зниження енерговитрат і стабілізація температури продукту під час зберігання і транспортування шляхом застосування ємностей (тари) з акумулюючою здатністю, за рахунок зменшення впливу на продукт коливань температури у вантажному просторі охолоджуваних камер.

Досягнення мети вимагає вирішення наступних завдань:

- розробка конструкції експериментальної ємності з акумулюючою здатністю, визначення конструктивних особливостей стандартної (контрольної) упаковки та вибір виду продукту для проведення експериментальних досліджень;

- розробка фізичної моделі та складання математичної моделі теплообміну між продуктом всередині упаковки і навколишнім середовищем при зміні температури навколишнього середовища за періодичним законом, з урахуванням теплоти дихання продукту, що дозволить оцінити вплив конструктивних особливостей упаковок на характер коливань температури продукту;

- розробка методики проведення експериментальних досліджень зі зберігання продукту в різних умовах порушень температурних режимів при використанні стандартних упаковок і експериментальних ємностей (з водяними прошарками) та створення експериментальних стендів;

- проведення експериментальних досліджень з визначення енергетичних витрат та впливу на продукт коливань температури повітря камери в різних умовах порушень температурних параметрів при використанні упаковок різної конфігурації (контрольних та експериментальних), аналіз і порівняння одержаних результатів;

- вибір оптимального конструктивного рішення ємності з підвищеною тепловою інерційністю і акумулювальною здатністю.

Об'єкт дослідження – охолоджувана ємність спеціальної конструкції з підвищеною тепловою інерційністю та акумулюючою здатністю.

Предмет дослідження – термоенергетичні показники при зберіганні продукту в різних умовах.

Методи досліджень. Математичне моделювання теплообміну між продуктом та навколишнім середовищем в умовах періодичних коливань температури охолоджуваного простору, з урахуванням теплоти дихання. Експериментальні дослідження з визначення впливу ємностей з акумулюючою здатністю на енергетичні витрати і якість продукту в різних умовах. Порівняння результатів розрахунків та експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше проведено дослідження з використання ємностей з акумулюючою здатністю для захисту продукту від температурних коливань навколишнього середовища та зниження енерговитрат під час його зберігання і транспортування.

Розроблено конструкції охолоджуваних ємностей з акумулюючою здатністю (контейнерів і закритих стоякових піддонів). Запропоновані технічні рішення ємностей, що виготовлені з полімерного матеріалу, з подвійними стінками, зазор між якими заповнений рідиною з високою тепловою інерційністю (вода, водяні розчини солей, незамерзаюча вода у капілярних трубках, багатоатомні спирти та їх водяні розчини).

Використання охолоджуваних ємностей з рідинним прошарком дозволяє акумулювати холод в цьому прошарку, і у охолоджуваному просторі в цілому, знижує енергетичні витрати під час зберігання і транспортування продукту, стабілізує його температуру при коливаннях температури повітря навколишнього середовища різного характеру, що сприяє продовженню терміну зберігання та зменшенню втрат продукту.

В результаті експериментальних і аналітичних досліджень вперше встановлено, що застосування ємностей з водяними прошарками, попередньо охолоджених перед завантаженням охолодженим продуктом, дозволяє:

- зменшити втрати рослинної сировини більш, ніж на 30%, сприяє збереженню якості продукту;
- знизити енергетичні витрати на зберігання на 17-21% при температурі зовнішнього повітря 20-30 °C (що відповідає умовам зберігання в холодильних камерах комерційних холодильників, супермаркетів, тощо).

Розроблена математична модель теплообміну між упаковкою з продуктом і навколишнім середовищем, з урахуванням теплоти дихання, що дозволяє спрогнозувати величину коливань температури продукту, та оцінити вплив розробленого конструктивного рішення на стабільність підтримання температури продукту. Вперше характер періодичних коливань температури навколишнього середовища розглянутий

як послідовні процеси повільного нагрівання і швидкого охолодження, при цьому періодичний закон зміни температури навколишнього середовища описаний двома експонентами з різними сталими часу.

Достовірність і обґрунтованість наукових положень, що захищаються, і отриманих результатів, підтверджуються: коректністю постановки задач і методики проведення експериментальних досліджень; використанням методів математичного моделювання для розв'язання задачі з визначення впливу конструктивних особливостей ємностей з акумулюючою здатністю на характер коливань температури продукту, при зміні температури навколишнього середовища за періодичним законом; перевіркою адекватності запропонованої математичної моделі шляхом порівняння розрахункових і експериментальних результатів досліджень.

Практичне значення отриманих результатів. На основі проведених експериментальних досліджень і розрахунків отримано 6 патентів України на корисні моделі. Промислове впровадження запатентованих ємностей з акумулюючою здатністю та способів зберігання продукту дозволить значно зменшити загальні енергетичні витрати і втрати продукту під час зберігання і транспортування. Розроблені засоби зниження енерговитрат і захисту продукту від коливань температури можуть бути використані незалежно від типу охолоджуваних камер і термінів їх експлуатації. Запропоновані в роботі технічні рішення впроваджені в роботу ТОВ «АРБАТ ПЛЮС» та ДП «Електроніка» АТ «Електроніка». Результати дисертації впроваджені у навчальний процес вивчення курсу «Холодильна техніка і технологія», для студентів спеціальності 142 – енергетичне машинобудування освітньо-кваліфікаційних рівнів «бакалавр» і «магістр».

Особистий внесок здобувача полягає в: формулюванні й обґрунтуванні наукових положень дисертації; розробці математичної моделі для визначення впливу постійних періодичних коливань температури на характер зміни температури продукту; розробці методики проведення експериментальних досліджень з визначення впливу ємностей різної конфігурації на енергетичні витрати і якість продукту в різних умовах порушень температурних режимів; участі в створенні експериментальних стендів; обробці результатів експериментів; проведенні розрахунків за математичною моделлю; порівнянні результатів розрахунків з експериментальними даними.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації представлені та обговорені на міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (Одеса, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015 ОНАХТ), «Сталий розвиток та штучний холод» (2012, Одеса, ОНАХТ), «Energy of Moldova – 2012. Regional aspects of Development» (2012, Chisinau, Republic of Moldova), «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (2018, Миколаїв, НУК ім. адм. Макарова), всеукраїнській конференції молодих вчених і студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» (Одеса, 2013).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи представлено в 29 статтях, з яких: 10 – статті у наукових виданнях та збірниках наукових праць, що входять до Переліку фахових видань ВАК України, 2 – статті в іноземних наукових виданнях, 6 патентів України на корисну модель, 11 статей – у вигляді доповідей та тез доповідей у збірниках наукових праць регіональних і міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу,

чотирьох розділів, висновків, списку літератури з 173 найменувань, і 4 додатків. Загальний обсяг становить 185 сторінок, в тому числі 128 сторінок основного тексту, 21 таблиць і 45 ілюстрацій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, відображено зв'язок з державними програмами і темами, сформульовано мету і завдання досліджень. Наведено одержані наукові результати, особистий внесок здобувача, основні публікації та відомості щодо апробації результатів дисертації.

У першому розділі дисертації розглянуто питання розробки засобів стабілізації температури продукту та зниження енергетичних витрат під час зберігання і транспортування в різних умовах порушень температурних режимів, що може бути досягнуто за рахунок застосування ємностей з акумулюючою здатністю.

Аналіз технологічних режимів зберігання різноманітної сировини свідчить, що визначальний вплив на стабільність температури продукту має амплітуда коливань температури повітря в охолоджуваному просторі, величина якої залежить від конструкційних особливостей камер, типів систем охолодження і розподілу повітря.

Результати обстежень холодильників різного призначення, виконані співробітниками ІХКЕ ОНАХТ, свідчать, що коливання температур повітря в камерах по висоті і по об'єму можуть досягати 8...12 °С.

Існуючі методи і засоби, спрямовані на забезпечення стабільності температури продукту, засновані на застосуванні модернізованих огорожувальних конструкцій та охолоджуючих систем, не передбачають захист продукту від коливань температури навколишнього середовища. До того ж, моральний та фізичний, який неминуче виникає при експлуатації охолоджуваних об'єктів, призводить до значного зростання енергетичних витрат.

З урахуванням вищевикладеного, актуальним є дослідження і розробка засобів для стабілізації температури продукту та зниження енерговитрат під час його зберігання і транспортування.

Як засіб зниження енерговитрат при роботі холодильного обладнання та стабілізації температури продукту в умовах порушень температурних режимів запропоновано використання охолоджуваних ємностей спеціальної конструкції, виготовлених з полімерного матеріалу, з прошарками із рідини з високою тепловою інерційністю – контейнерів та закритих стоякових піддонів. Як рідина з високою тепловою інерційністю може бути використана вода, водяні розчини солей, незамерзаюча вода у капілярних трубках, багатоатомні спирти (гліцерин, продукти його термічної олігомерізації, пропіленгліколь) або їх водяні розчини.

Другий розділ присвячено розробці математичної моделі теплообміну в умовах періодичних коливань температури навколишнього середовища при використанні упаковок різної конструкції. Коливання температури в охолоджуваному просторі призводять до коливань температури продукту, при цьому змінюється кількість тепла, що виділяється при диханні, тому можна вважати, що зберігання здійснюють при нестационарному режимі.

При розробці моделі прийняті такі допущення:

- 1) тепло з поверхні об'єкта зберігання відводиться рівномірно, температура продукту однакова і дорівнює середній температурі продукту всередині упаковки;
- 2) відведення тепла від поверхні об'єкта, поміщеного в середовище, температура якого змінюється за періодичним законом, здійснюється конвективним шляхом.

Продукт в упаковці представлений як фізичне тіло довільної форми, із заданими площею поверхні ($F_{\text{пов.}}$, м^2) і об'ємом, укладене в 1...n захисних оболонок (залежно від типу упаковки) (рис. 1), що знаходиться в середовищі, температура якого змінюється за періодичним законом. Конвективний коефіцієнт тепловіддачі від поверхні до навколишнього середовища ($\alpha_{\text{пов.}}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$), теплоємність ($c_{\text{пр.}}$, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$), густина ($\rho_{\text{пр.}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$) прийняті сталими. Оболонки – стінки упаковок і рідинні прошарки. Теплообмін з навколишнім середовищем відбувається за законом Ньютона-Рихмана (конвективний теплообмін при граничних умовах 3-го роду). Всередині тіла безперервно діє джерело тепла потужністю $Q_{\text{дих.}}$.

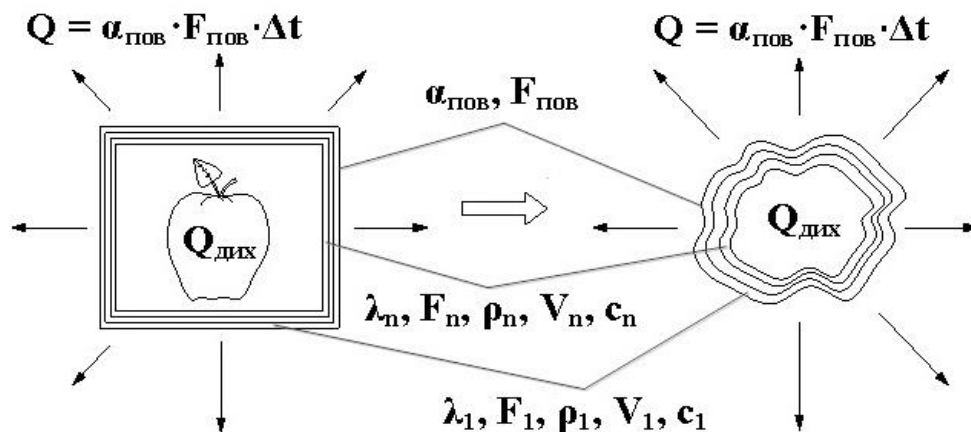


Рис. 1. Розрахункова схема теплообміну між продуктом всередині упаковки і навколишнім середовищем

Визначення характеру коливань температури продукту ($t_{\text{пр.}}$) всередині упаковки при постійних періодичних коливаннях температури навколишнього середовища ($t_{\text{н.с.}}$), за наявності тепловиділень продукту вимагає розкладання на дві окремі задачі, з наступним складанням розв'язків:

- 1) визначення залежності зміни температури продукту при зміні температури навколишнього середовища за періодичним законом;
- 2) визначення впливу теплоти дихання на температуру продукту.

Для розв'язку *першої задачі* послідовно розглянуті процеси охолодження / нагрівання однорідного тіла, температурний режим однорідного тіла при періодичній зміні температури його поверхні, температурний режим однорідного тіла в оболонці.

Рівняння теплообміну між продуктом в упаковці і навколишнім середовищем:

$$Q = \alpha_{\text{пов.}} \cdot F_{\text{пов.}} \cdot \Delta t + Q_{\text{дих.}}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

де Q – тепловий потік, що відводиться від продукту, Вт.

Для однорідного фізичного тіла, що знаходиться у середовищі, температура якого змінюється за періодичним, наприклад, косинусоїдальним законом:

$$t_{\text{н.с.}}(\tau) = t_{\text{н.с.сер.}} \cdot \cos(\omega \cdot \tau) \quad (2)$$

рівняння, що описує температурний режим тіла, має вигляд:

$$\frac{\rho_{\text{пр}} \cdot c_{\text{пр}} \cdot V_{\text{пр}}}{\alpha_{\text{пов}} \cdot F_{\text{пов}}} \cdot \frac{dt}{d\tau} + t_{\text{пр}}(\tau) = t_{\text{н.с.}}(\tau) \quad (3)$$

Розв'язком рівняння (3) є косинусоїда:

$$t_{\text{пр}}(\tau) = t_{\text{пр.сер.}} \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi) \quad (4)$$

Підставляючи (4) в (3), отримуємо:

$$\frac{\rho_{\text{пр}} \cdot c_{\text{пр}} \cdot V_{\text{пр}}}{\alpha_{\text{пов}} \cdot F_{\text{пов}}} \cdot \omega \cdot t_{\text{пр.сер.}} \cdot \cos\left(\omega \cdot \tau + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) + t_{\text{пр.сер.}} \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi) = t_{\text{н.с.сер.}} \cdot \cos(\omega \cdot \tau) \quad (5)$$

Середня температура продукту:

$$t_{\text{пр.сер.}} = \frac{t_{\text{н.с.сер.}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_{\text{пр}} \cdot c_{\text{пр}} \cdot V_{\text{пр}}}{\alpha_{\text{пов}} \cdot F_{\text{пов}}} \cdot \omega\right)^2}} \quad (6)$$

Кут зсуву по фазі між температурою тіла і $t_{\text{н.с.}}$:

$$\varphi = -\arctg\left(\frac{\rho_{\text{пр}} \cdot c_{\text{пр}} \cdot V_{\text{пр}}}{\alpha_{\text{пов}} \cdot F_{\text{пов}}} \cdot \omega\right)^2 \quad (7)$$

Для синусоїди рівняння, що описує температурний режим тіла, знаходять аналогічно.

Якщо однорідне тіло укласти в 1...n оболонок, то ці оболонки створять додаткові теплові опори; поверхню конвективного теплообміну також можна розглядати як тепловий опір на шляху руху теплового потоку, таким чином, за наявності опорів однієї або декількох оболонок рівняння 3 прийме вигляд:

$$\Sigma \rho \cdot c \cdot V \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{пов}} \cdot F_{\text{пов}}} + \Sigma \frac{1}{\lambda_{\text{об.і}} \cdot F_{\text{об.і}}} \right) \cdot \frac{dt}{d\tau} + t_{\text{пр}}(\tau) = t_{\text{н.с.}}(\tau), \quad (8)$$

де

$$\Sigma \rho \cdot c \cdot V = \rho_{\text{пр.}} \cdot c_{\text{пр.}} \cdot V_{\text{пр.}} + \Sigma \rho_{\text{об.і}} \cdot c_{\text{об.і}} \cdot V_{\text{об.і}}$$

Рівняння (8) відрізняється від рівняння (3) тільки коефіцієнтом перед похідною, тому їх розв'язки ідентичні.

При несинусоїдальній періодичній зміні температури навколишнього середовища для знаходження температури тіла використано розкладання несинусоїдальної функції в ряд Фур'є з наступним розв'язком задачі для кожної гармоніки.

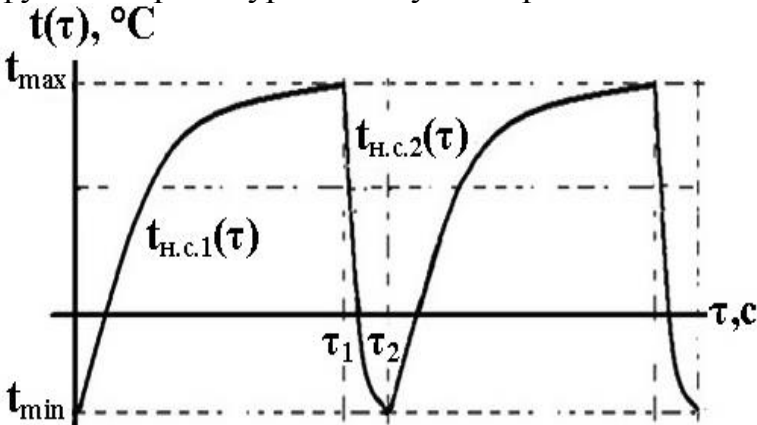


Рис. 2. Характер зміни температури повітря в охолоджуваному просторі

Характер зміни температури повітря в охолоджуваному просторі можна описати двома експоненціальними функціями з різними сталими часу на ділянках зростання та спадання температури (рис. 2):

при $0 < \tau < z_1$:

$$t_{\text{н.с.1}}(\tau) = t_{\text{н.с.1}} \cdot e^{\left(-\frac{\tau}{z}\right)} + G_1 \quad (9)$$

при $\tau_1 < \tau < z_2$:

$$t_{\text{н.с.2}}(\tau) = t_{\text{н.с.2}} \cdot e^{\left(-\frac{\tau}{z}\right)} + G_2 \quad (10)$$

Розкладання функції в ряд Фур'є в загальному випадку має вигляд:

$$t_{\text{н.с.}}(\tau) = t_{\text{н.с.сер.}} + \Sigma_1^n (a_k \cdot \cos k\omega\tau + b_k \cdot \sin k\omega\tau) \quad (11)$$

де $k = 1, 2, 3, 4, 5, \dots n$ – число гармонік; a_k, b_k – сталі інтегрування.
Остаточний розв'язок, з урахуванням (6) і (10):

$$t_{пр}(\tau) = t_{н.с.сер} + \sum_1^n \frac{a_k}{\sqrt{1 + \left(\sum \rho \cdot c \cdot V \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \sum \frac{1}{\lambda_{об_i} \cdot F_{об_i}} \right) \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \right)^2}} \cdot \cos \left(\frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \cdot \tau + \varphi \right) + \sum_1^n \frac{a_k}{\sqrt{1 + \left(\sum \rho \cdot c \cdot V \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \sum \frac{1}{\lambda_{об_i} \cdot F_{об_i}} \right) \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \right)^2}} \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \cdot \tau + \varphi \right) \quad (12)$$

де

$$\varphi = -\arctg \left(\sum \rho \cdot c \cdot V \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \sum \frac{1}{\lambda_{об_i} \cdot F_{об_i}} \right) \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \right) \quad (13)$$

Розв'язок задачі з визначення зміни температури тіла за рахунок виділення теплоти дихання аналогічний розв'язку задачі охолодження конвективним шляхом кусково-однорідної кулі.

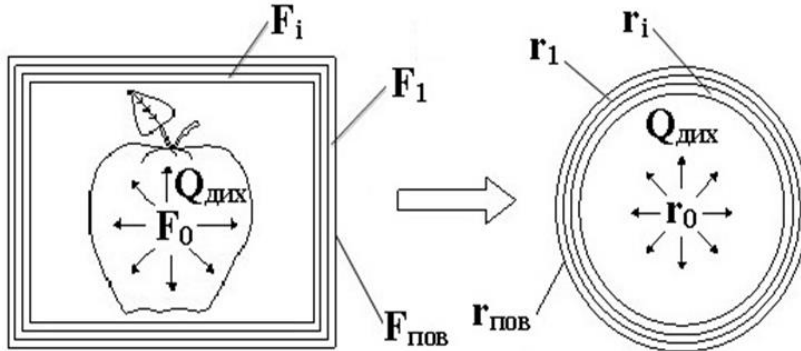


Рис. 3. Розрахункова
схема до визначення теплоти дихання

Використовували спрощену модель із сфер із заданими теплофізичними і геометричними характеристиками (рис. 3). Радіуси сфер приймали відповідно до площ поверхонь, що беруть участь у теплообміні. Загальний розв'язок задачі теплопровідності в межах i -ї сфери:

$$t_i = -\frac{1}{\lambda_i} \cdot \frac{q_i r^2}{6} + \frac{A_i}{r} + B_i \quad (14)$$

У третьому розділі описані варіанти конструктивних рішень ємностей з акумулюючою здатністю. Наведена методика проведення експериментальних досліджень. Описані експериментальні стенди для проведення досліджень з визначення впливу конструктивних характеристик упаковок – експериментальних охолоджуваних ємностей і контрольних упаковок (стандартної конфігурації) на зміну температури продукту та енергетичні витрати в рівних умовах.

Експериментальна ємність – ящик з кришкою, з полімерного матеріалу, з подвійними стінками. Між зовнішніми та внутрішніми стінками по всьому периметру утворений зазор, заповнений водою. В кришці передбачені отвори для доступу повітря до продукту, для підведення датчиків температури (або термопар).

Дослідження проводили на яблуках «Гала» 1 сорту, у стадії знімної зрілості.

Проведені дослідження з визначення впливу конструктивних характеристик упаковок різної конфігурації (контрольних і експериментальних):

- а) на зміну температури продукту в умовах зовнішніх теплових навантажень;
- б) на зміну температури продукту при постійних періодичних коливаннях температури повітря в камері;
- в) на енергетичні витрати при зберіганні продукту.

Контрольні і експериментальні упаковки попередньо охолоджували до температури їх стінок, близької до середньої температури в камері ($t_{\text{кам.сер}}$). Воду для експериментальних упаковок і яблука також охолоджували до температури, близької до $t_{\text{кам.сер}}$. В охолоджені упаковки закладали охолоджені яблука. Потім упаковки закладали на зберігання до охолоджуваної камери.

Використовували контейнери з полімерних матеріалів різних розмірів.

Для створення контрольної упаковки контейнер заповнювали охолодженими яблуками, та закривали кришкою.

Для створення експериментальної ємності у контейнер поміщали попередньо охолоджені яблука, закривали кришкою, і поміщали в контейнер більшого розміру. В прошарок між контейнерами заливали охолоджену воду, так, щоб внутрішній контейнер з яблуками був повністю занурений у воду, і товщина шару води була однаковою з усіх сторін. Зовнішній контейнер закривали кришкою. Відстань між стінками двох контейнерів визначала товщину водяного прошарку.

Під час досліджень з визначення впливу конструктивних характеристик ємностей з акумулюючою здатністю на коливання температури продукту та перевірки математичної моделі коливання температури повітря охолоджуваних камер підтримували на рівні $8...10\text{ }^{\circ}\text{C}$. $t_{\text{кам.сер}}$ становила $2,3...2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає вимогам діючих стандартів і норм стосовно умов зберігання рослинної сировини.

Дослідження з визначення впливу конструктивних характеристик упаковок на зміну $t_{\text{пр}}$ в умовах зовнішніх теплових навантажень. Використовували 3 пластикових контейнера: два розмірами $217 \times 155 \times 107\text{ мм}$, і один $285 \times 224 \times 217\text{ мм}$. Товщина водяних прошарків (δ_w) в експериментальних упаковках для всіх дослідів – 34 мм . Підготовлені упаковки одночасно закладали до камери холодильника LG (Корея) ($t_{\text{кам.сер}} = 2,3...2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), амплітуда коливань температури ($A_{\text{кам.сер}}$) в якій досягала $8...10\text{ }^{\circ}\text{C}$ за півтори години (рис. 3а). Потім двері камери періодично відкривали, протягом певного проміжку часу, створюючи зовнішній тепловий вплив.

Дослідження з визначення впливу конструктивних характеристик упаковок на зміну $t_{\text{пр}}$ при постійних періодичних коливаннях температури повітря в камері. Використовували 4 контейнера з оргскла товщиною 3 мм : два $600 \times 400 \times 288\text{ мм}$ – як контрольну упаковку, та як зовнішній контейнер експериментальної упаковки, а також два контейнера менших розмірів – $580 \times 380 \times 268\text{ мм}$ і $540 \times 340 \times 228\text{ мм}$, як внутрішні контейнери експериментальних ємностей з водяними прошарками 7 мм , і 27 мм , відповідно. Підготовлені упаковки – контрольну та експериментальну – одночасно закладали до холодильної камери КХК-6, в якій при $t_{\text{кам.сер}} = 2,3...2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурні коливання від мінус $3,4$ до $5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ створювали за рахунок збільшення диференціала терморегулятора. Упаковки в камері розміщували на металевій стійці висотою 750 мм , на відстані 200 мм одна від одної (рис. 3б).

Попередньо провели дослід з неохолодженими яблуками, $t_{\text{пр}} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому контейнери охолоджували, в прошарок ($\delta_w = 27\text{ мм}$) між зовнішнім і внутрішнім контейнером експериментальної ємності заливали охолоджену воду. Температура в камері змінювалась від мінус $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $t_{\text{кам.сер}} \approx 2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_{\text{кам.сер}} \approx 8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Періодичність змінення температури ≈ 1 година. Тривалість зберігання – діб.

Подальші досліді проводили при попередньому охолодженні яблук, води і контейнерів до температури, близької до $t_{\text{кам.сер}}$. Тривалість зберігання – 4 тижні.

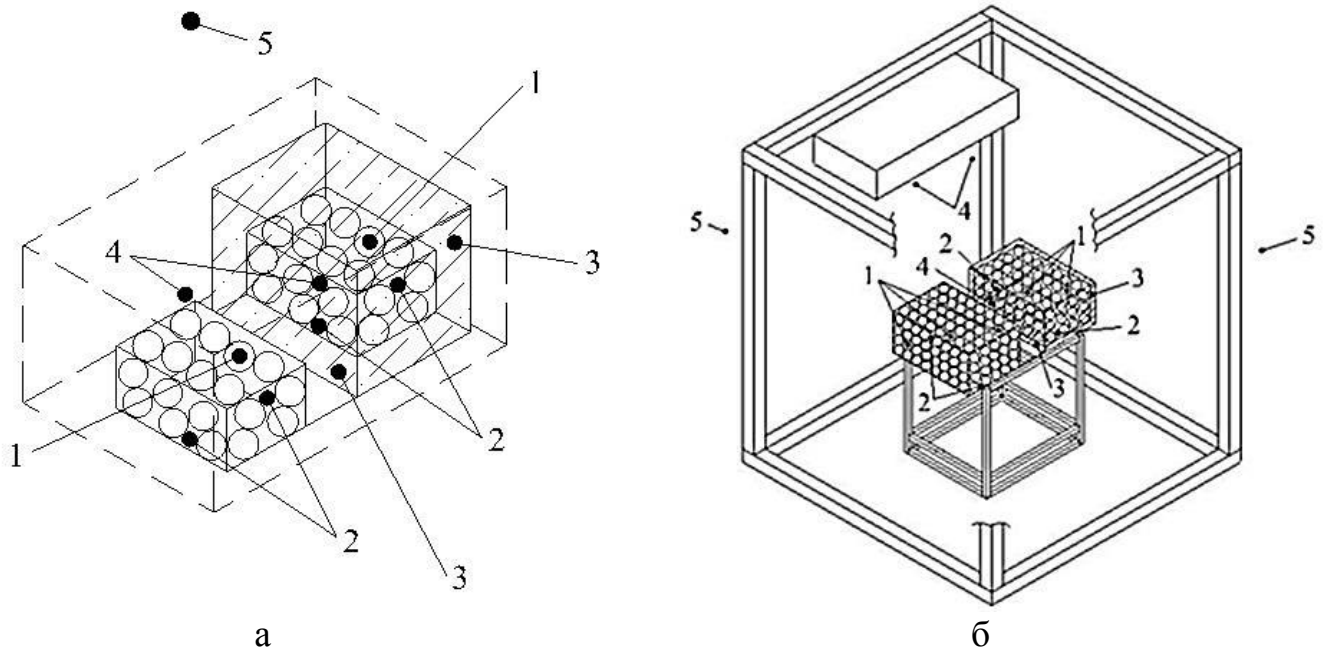


Рис. 3. Схема розміщення упаковок з розташуванням датчиків температури 1 – t_{np} ; 2 – температура повітря всередині упаковок; 3 – температура води в прошарку; 4 – $t_{кам}$; 5 – температура повітря в лабораторії

Втрату маси яблук визначали за кожний тиждень. По закінченню зберігання проводили візуальну оцінку якості і визначали загальну втрату маси плодів.

Для проведення розрахунків безперервно фіксували температури повітря в камері і всередині упаковок, експериментально визначали величину інтенсивності дихання при середній температурі плодів і розраховували значення питомої теплоти дихання; визначали геометричні та теплофізичні властивості плодів і упаковок.

Під час досліджень з визначення впливу конструктивних характеристик упаковок на коливання температури плодів (а, б) вимірювали температури поверхні яблук в упаковках (1), повітря всередині упаковок – у нижній і верхній частині (2), води (t_w) у верхній і нижній частині прошарку (3), повітря в камері (4), і в лабораторії (5).

Дослідження з визначення впливу конструктивних характеристик упаковок на енергетичні витрати. Під час досліджень амплітуда коливань температури повітря охолоджуваної камери становила 1,65...2,56 °С, при $t_{кам.сер.} = 2,53...2,58$ °С.

Використовували 4 контейнера з оргскла: 140×140×140 мм (як контрольну упаковку та як внутрішній контейнер експериментальної упаковки), 160×160×160 мм, 180×180×180 мм та 200×200×200 мм. Товщина водяних прошарків в експериментальних ємностях – 7, 17 та 27 мм. Підготовлену упаковку, контрольну або експериментальну, по черзі закладали до камери холодильника PROFILO ($t_{кам.сер.} = 2,4...2,6$ °С). Витрати енергії визначали за допомогою датчика витрат електроенергії Lemanso LM669, підключеного до мережі живлення холодильника. Термін зберігання – 3-5 днів, по закінченню зберігання визначали втрату маси плодів (рис 4).

Під час досліджень вимірювали температури: поверхні яблук (1), 2-х протилежних зовнішніх стінок упаковки (2), води в прошарках (3) з двох протилежних сторін, повітря в камері (4), і в лабораторії (5).

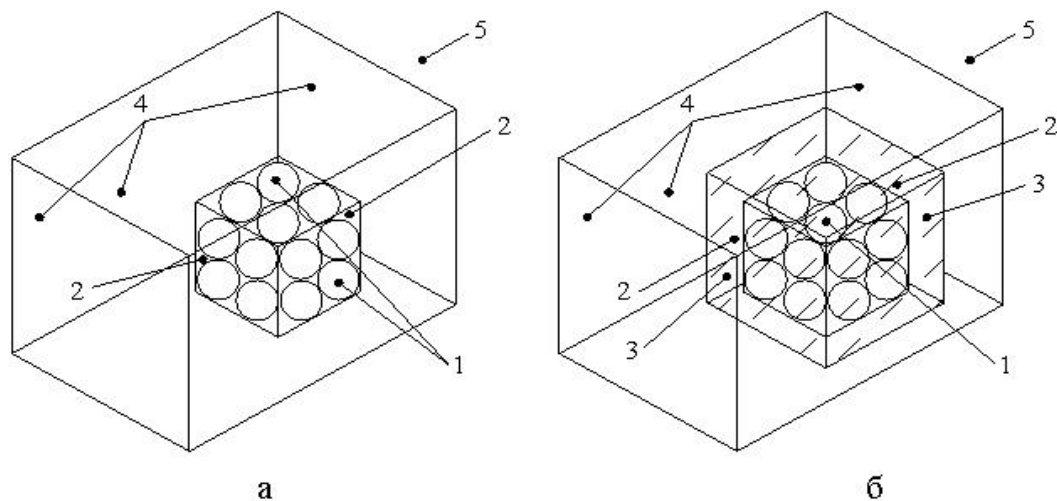


Рис. 4. Схема розміщення упаковок в камері з розташуванням термодпар
а – стандартна упаковка, б – експериментальна упаковка

У четвертому розділі дисертації наведені результати експериментальних досліджень та їх зіставлення з розрахунками з математичної моделі.

Результати досліджень з визначення впливу зовнішніх теплових навантажень на стабільність температури продукту. Під час досліду з визначення впливу частих короткочасних зовнішніх теплових навантажень (відкривання дверей камери на 3 хвилини через кожні 12 хвилин, протягом 3 годин 30 хвилин) початкова температура плодів в експериментальній упаковці була 1,3 °С, в контрольній 2 °С. Під час досліду $t_{пр}$ в експериментальній упаковці підвищилась на 0,6 °С (з 1,3 °С до

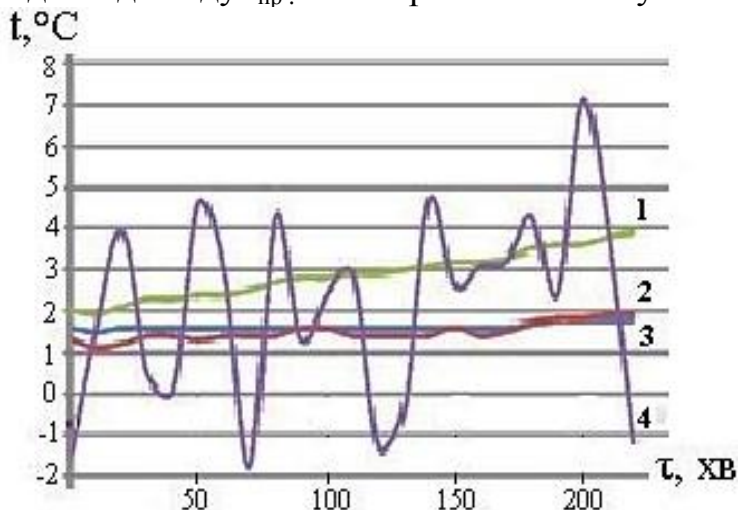


Рис. 4. Зміна температури при зовнішніх теплових навантаженнях

1 – $t_{пр}$ в контрольній упаковці; 2 – $t_{пр}$ в експериментальній ємності; 3 – t_w , 4 – $t_{кам}$.

- збільшився час досягнення максимальної температури продукту (через 35-65 хвилин після припинення дослідів);

- по закінченню дослідів зростає час досягнення початкової температури продукту – від 255...405 хвилин до 720 хвилин (тобто, в 1,7...2,8 разів), що пов'язано

1,9 °С), в контрольній – на 1,9 °С (з 2 °С до 3,9 °С). Отже, застосування ємності з акумулюючою здатністю сприяло зменшенню коливань $t_{пр}$ продукту в 3,2 рази (рис. 4).

Результати дослідів з визначення впливу триваліших за часом теплових навантажень (відкривання дверей камери на 15 хвилин через кожні 30 хвилин протягом 5 годин 45 хвилин та через кожні 60 хвилин протягом 8 годин 45 хвилин) показали, що при застосуванні ємностей з акумулюючою здатністю:

- підвищення $t_{пр}$ зменшилося на 1,2...1,4 °С (в 1,8...2,1 раз);

- максимальна зміна $t_{пр}$ зменшилась на 1,1 °С (в 1,5...1,8 раз);

зі зниженням перепаду $t_{пр.}$ за одну годину – від $0,3...0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\leq 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в 3...4,5 раз);
 - коливання $t_{пр.}$ зменшилися від $0,6...0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0...0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в 3...10 разів).

Характер зміни температури продукту показаний на рис. 5, узагальнені результати досліджень – в таблиці 3.

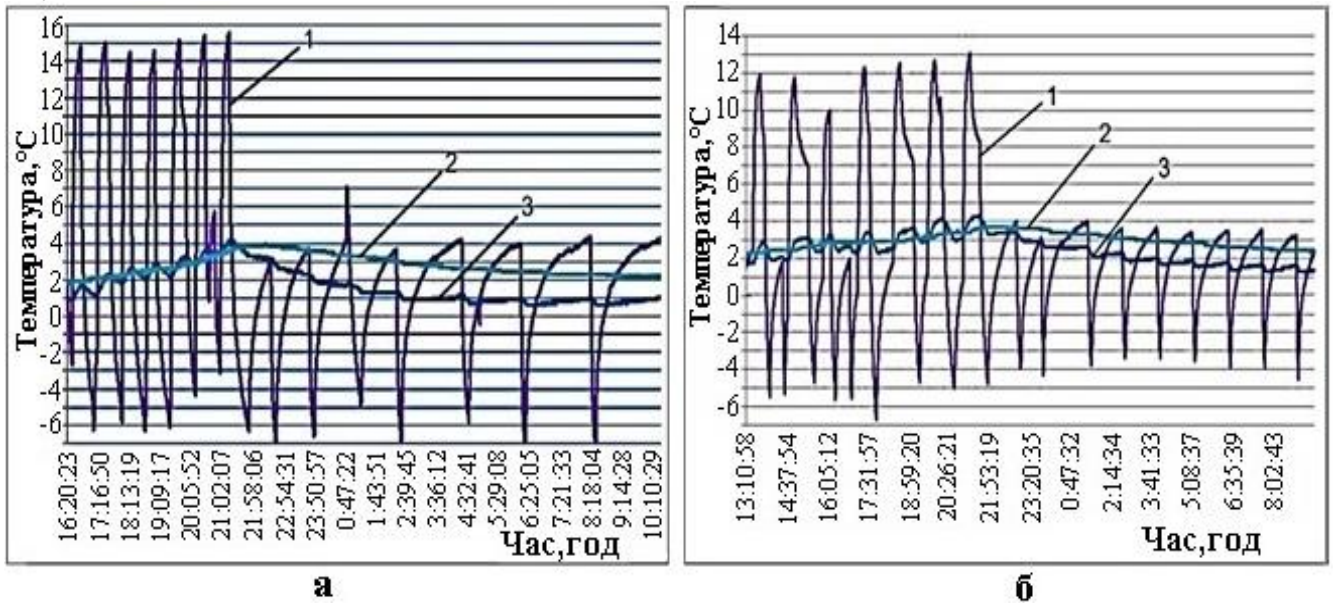


Рис. 5. Зміна температури при зовнішніх теплових навантаженнях
 а – відкривання дверей камери через 30 хвилин; б – відкривання дверей камери через 60 хвилин; 1 – $t_{кам.}$; 2 – $t_{пр.}$ в експериментальній ємності з водяним прошарком, 3 – $t_{пр.}$ в контрольній упаковці

Таблиця 3

Зміна температури продукту при періодичних зовнішніх теплових впливах

Показник	Відкривання дверей камери на 15 хвилин через кожні 30 хвилин		Відкривання дверей камери на 15 хвилин через кожні 30 хвилин	
	Упаковка		Упаковка	
	контрольна	с водяним прошарком	контрольна	с водяним прошарком
Початкова $t_{пр.}, ^{\circ}\text{C}$	0,9	1,8	2,3	1,8
Підвищення $t_{пр.}, ^{\circ}\text{C}$	3,2	1,8	2,3	1,1
Максимальний перепад $t_{пр.}, ^{\circ}\text{C}$	3,2	2,1	2,5	1,4
Максимальна $t_{пр.}, ^{\circ}\text{C}$	4,1	4	4,3	3,7
Коливання $t_{пр.}, ^{\circ}\text{C}$	0,6...1	0...0,2	0,6...1	0...0,2
Час досягнення початкової $t_{пр}$ по закінченню дослідів	4 годин 15 хвилин	12 годин	6 годин 45 хвилин	12 годин
Зміна $t_{пр}$ за одну годину, $^{\circ}\text{C}$	0,3...0,9	$\leq 0,2$	0,3...0,9	$\leq 0,2$

Результати досліджень з визначення впливу конструктивних характеристик упаковок при постійних періодичних коливаннях температури повітря в камері на температуру продукту показали, що при закладанні на зберігання неохолоджених

плодів в експериментальній ємності встановилася підвищена температура плодів, але з мінімальними коливаннями ($0...0,1^{\circ}\text{C}$). В стандартній упаковці середня температура плодів $t_{\text{пр.сер.}} \approx 2,9^{\circ}\text{C}$ встановилася через 11-12 годин після закладання до камери, і дещо перевищувала $t_{\text{кам.сер.}} \approx 2,8^{\circ}\text{C}$. До закінчення досліду (протягом 6,5 діб) $t_{\text{пр.}}$ змінювалась від $2,6^{\circ}\text{C}$ до $3,1^{\circ}\text{C}$. В експериментальній ємності $t_{\text{пр.}}$ встановилася через 21-22 години після закладання до камери, і у наступні 6 діб складала $3,3...3,4^{\circ}\text{C}$, перевищуючи $t_{\text{кам.сер.}}$ на $0,5...0,6^{\circ}\text{C}$.

Зберігання попередньо охолоджених яблук здійснювали протягом 4 тижнів. Під час досліджень температура води (t_w) в прошарках була близькою до $t_{\text{кам.сер.}}$, з амплітудою коливань $0,3...0,4^{\circ}\text{C}$; зміна t_w за одну годину не перевищував $0,1^{\circ}\text{C}$.

При зберіганні в експериментальній упаковці з водяним прошарком 7 мм (вага плодів $m_{\text{пр}} = 21,7$ кг) температура плодів змінювалась від $2,2^{\circ}\text{C}$ до $2,4^{\circ}\text{C}$, в контрольній ($m_{\text{пр}} = 25,5$ кг) – від $1,9...2,0^{\circ}\text{C}$ до $2,5...2,6^{\circ}\text{C}$. Коливання $t_{\text{пр.}}$: в експериментальній упаковці – $0...0,2^{\circ}\text{C}$, в контрольній – $0,6...0,7^{\circ}\text{C}$.

В експериментальній упаковці з $\delta_w = 27$ мм ($m_{\text{пр}} = 15,3$ кг) $t_{\text{пр.}} = 2,8...2,9^{\circ}\text{C}$, в контрольній ($m_{\text{пр}} = 25,4$ кг) змінювалась від $2,5...2,6^{\circ}\text{C}$ до $3,1...3,2^{\circ}\text{C}$. Коливання $t_{\text{пр.}}$: в експериментальній упаковці $0...0,1^{\circ}\text{C}$, в контрольній – $0,5...0,6^{\circ}\text{C}$.

Дослідження показали, що при періодичних коливаннях температури повітря в камері коливання $t_{\text{пр.}}$ в ємностях з водяними прошарками 7 і 27 мм знижуються до $0...0,2^{\circ}\text{C}$, порівняно з коливаннями $t_{\text{пр.}}$ в стандартних упаковках – $0,4...0,7^{\circ}\text{C}$ (середні значення – $0,5...0,6^{\circ}\text{C}$), а частота коливань $t_{\text{пр.}}$ зменшується при збільшенні товщини прошарку (рис. 6). При цьому збільшення товщини водяного прошарку не призводить до значного зниження коливань $t_{\text{пр.}}$: $0...0,2^{\circ}\text{C}$ – при $\delta_w = 7$ мм; $0...0,1^{\circ}\text{C}$ – при $\delta_w = 27$ мм.

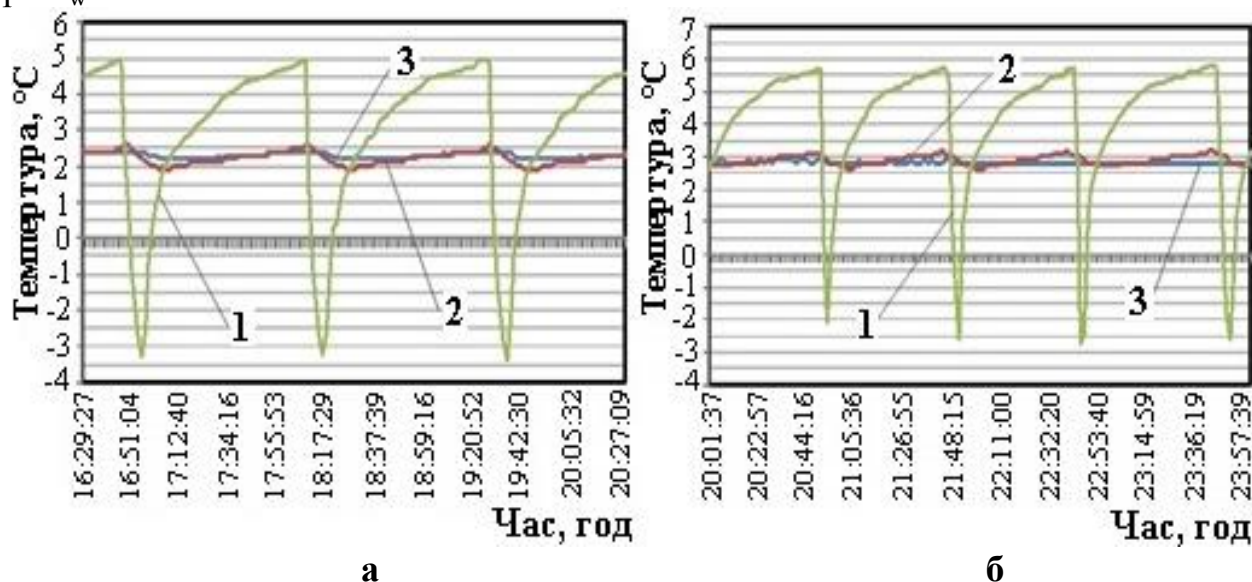


Рис. 6 – Зміна температури плодів при періодичних коливаннях температури повітря в камері

1 – $t_{\text{кам.}}$; 2 – $t_{\text{пр.}}$ в ємності з водяним прошарком: а) $\delta_w = 7$ мм, б) $\delta_w = 27$ мм;
3 – $t_{\text{пр.}}$ в контрольній упаковці.

Втрати маси яблук в експериментальних упаковках за 4 тижні становили $0,47\%$ ($\delta_w = 27$ мм) і $0,49\%$ ($\delta_w = 7$ мм), що на 34% і 32% , відповідно, менше, ніж в контрольних (рис. 7). Середні за добу втрати маси в експериментальних упаковках

(0,0168...0,0175 г) на 32,7%...33,9% менше, ніж в контрольних (0,0254...0,026 г). Різниця втрат маси за період зберігання в ємностях з водяними прошарками 7 мм (0,49%) і 27 мм (0,47%) становила 4,1%, різниця середніх добових втрат маси – 4%.

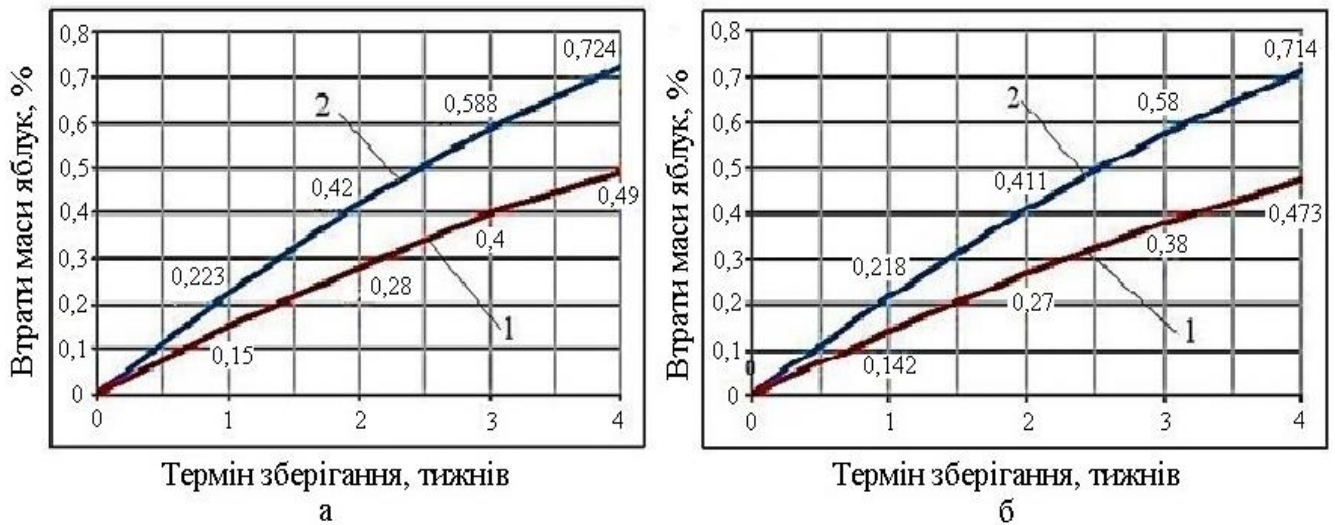


Рис. 7. Природні втрати маси яблук

1 – в експериментальних ємностях з водяними прошарками: а) $\delta_w = 7$ мм, б) $\delta_w = 27$ мм; 2 – в контрольних упаковках

Результати розрахунків за одержаними даними, проведені за математичною моделлю показані на рис. 8 і 9 і в таблиці 4.

Результати досліджень і розрахунків за математичною моделлю підтвердили, що застосування ємностей з акумулятивною здатністю сприяє зниженню до мінімуму коливань температури продукту. При цьому втрати маси зменшуються більш, ніж на 31%. Одержані дані показали ефективність застосування запропонованих ємностей.

Таблиця 4

Коливання температури плодів при зберіганні в експериментальних ємностях і контрольних упаковках при зміні $t_{\text{кам.}}$ за експоненціальним законом

Темпера- тура, °С	Дослід №1				Дослід №2			
	Тип упаковки							
	з прошарком 7 мм		стандартна		з прошарком 27 мм		стандартна	
t _{кам.сер} , °С	дослід/розрахунок				дослід/розрахунок			
	≈ 2,3/2,315				≈ 2,8/2,786			
Зміна t _{пр.} з урахуван- ням теплоти дихання, °С	дослід	розрах.	дослід	розрах.	дослід	розрах.	дослід	розрах.
	t _{пр. max} + Δt _{дих} , °С							
	2,4	2,494	2,5..2,6	2,668	2,9	2,854	3,1..3,2	3,087
	t _{пр. min} + Δt _{дих} , °С							
	2,2	2,229	1,9..2	2,124	2,8	2,762	2,6..2,7	2,638
	Δt = (t _{пр. max} – t _{пр. min}) + Δt _{дих} , °С							
	0,2	0,265	0,6..0,7	0,544	0,1	0,092	0,5..0,6	0,449

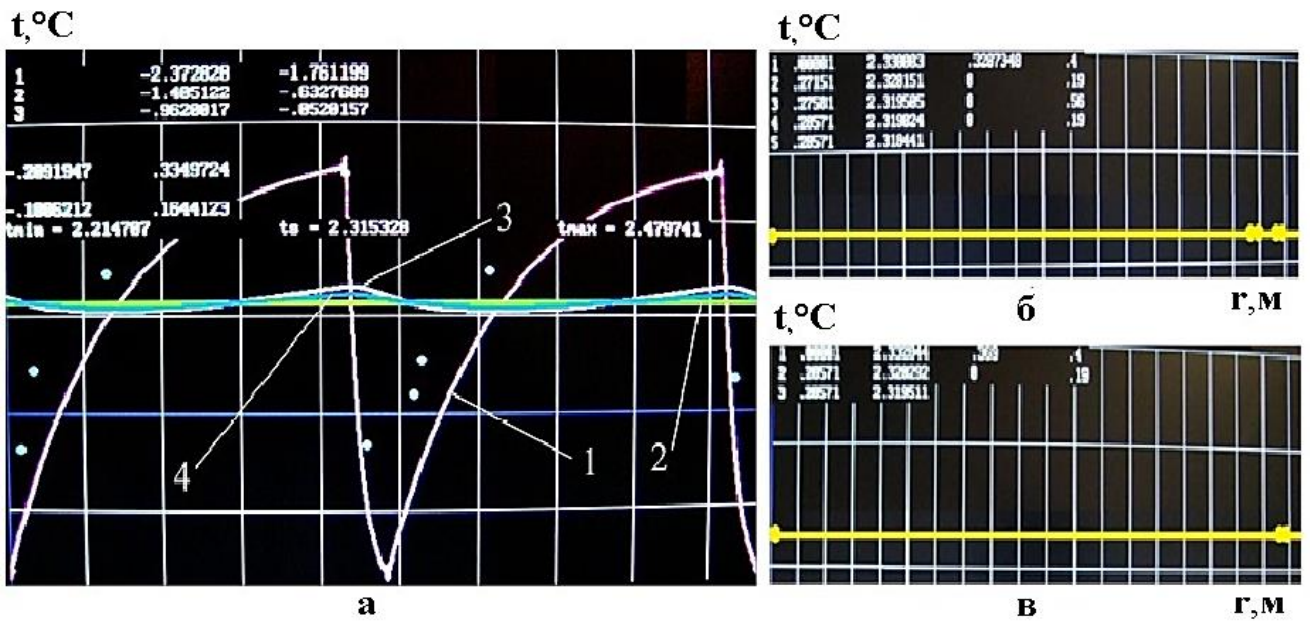


Рис. 8. Зміна t_{np} і теплота дихання продукту при $t_{\text{кам.сеп}} = 2,3 ^\circ\text{C}$

а – зміна t_{np} за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем: 1 – $t_{\text{кам}}$; 2 – t_{np} в контрольній упаковці; 3 – t_{np} в експериментальній ємності ($\delta_w = 7 \text{ мм}$), 4 – $t_{\text{кам.сеп}}$; теплота дихання: б – в експериментальній ємності; в – в контрольній упаковці

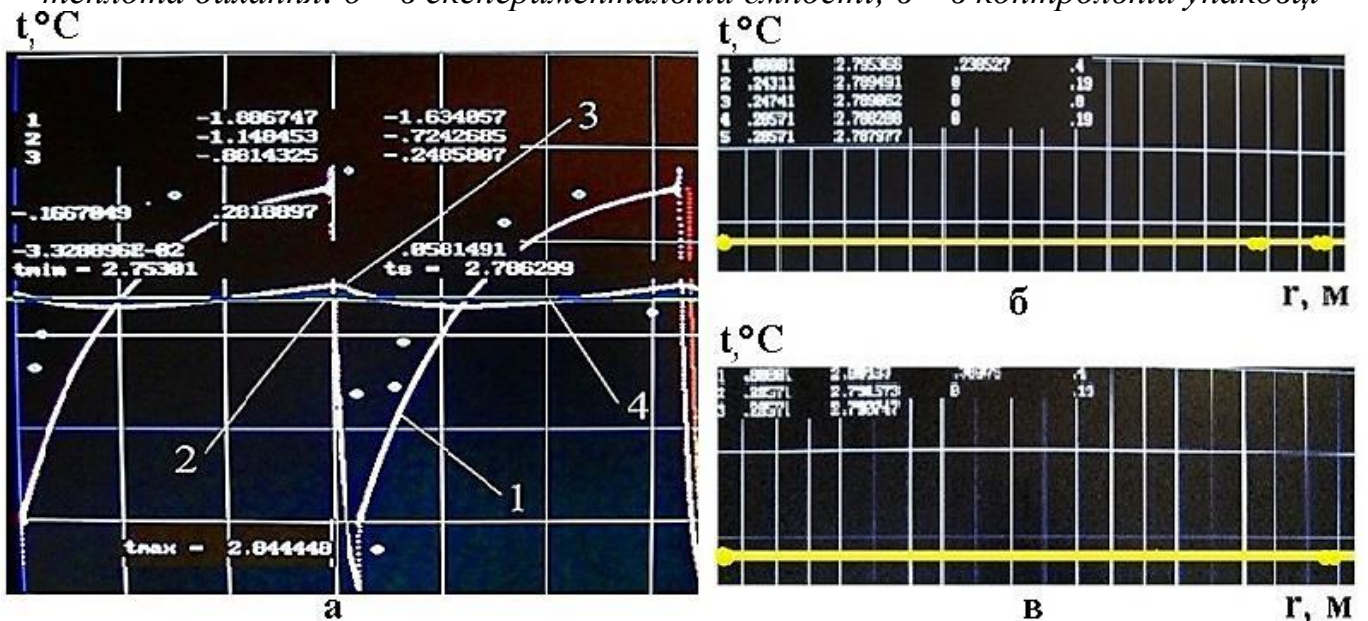


Рис. 9. Зміна t_{np} і теплота дихання продукту при $t_{\text{кам.сеп}} = 2,8 ^\circ\text{C}$

а – зміна t_{np} за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем: 1 – $t_{\text{кам}}$; 2 – t_{np} в контрольній упаковці; 3 – t_{np} в експериментальній ємності ($\delta_w = 27 \text{ мм}$), 4 – $t_{\text{кам.сеп}}$; теплота дихання: б – в експериментальній ємності; в – в контрольній упаковці

Дослідження з визначення енергетичних витрат показали, що при зберіганні плодів в ємностях з водяними прошарками питомі енергетичні витрати нижче на 17...21% в порівнянні з контрольною упаковкою (таблиця 5, рис.10).

Всього було проведено 6 дослідів: три – при температурі повітря в лабораторії $t_{\text{лаб.}} = 20...21 ^\circ\text{C}$, і три – при $t_{\text{лаб.}} = 28...30 ^\circ\text{C}$.

При $t_{\text{лаб.}} = 20...21 ^\circ\text{C}$ при використанні упаковки з водяним прошарком $\delta_w = 7 \text{ мм}$

витрати енергії на 1 кг продукту знизилися на 18,7%, упаковки з $\delta_w = 17$ мм – на 21,1%. При $t_{\text{лаб.}} = 28...30$ °С при використанні упаковки з $\delta_w = 7$ мм енерговитрати на 1 кг продукту знизилися на 17,5%, упаковки з $\delta_w = 27$ мм – на 20,8% (рис.10а, 10б).

Таблиця 5
Енергетичні витрати при використанні упаковок різної конфігурації

Показник	$t_{\text{лаб}} = 20 \dots 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$t_{\text{лаб}} = 28 \dots 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
	Товщина водяного прошарку в упаковці, δ_w , мм					
	0 мм	7 мм	17 мм	0 мм	7 мм	27 мм
Тривалість дослідів	92 год. 5 хв.	38 год. 27 хв.	70 год. 19 хв.	94 год. 54 хв.	95 год. 26 хв	74 год. 13 хв.
Маса яблук в упаковці, кг	0,896	1,099	1,188	1,211	1,126	1,202
Сумарні витрати енергії на 1 кг яблук, КВт·год/кг	21,17	7,18	12,74	23,65	19,65	14,65
Витрати енергії на 1 кг яблук за 1 добу, КВт·год/кг	5,52	4,48	4,35	5,98	4,94	4,74
Витрати енергії на 1 кг яблук за 60 хвилин, КВт·год/кг	0,23	0,187	0,181	0,249	0,206	0,197

Збільшення товщини водяного прошарку від 7 мм до 27 мм не призводить до значної економії енергії: різниця між енергетичними витратами при застосуванні упаковок з водяними прошарками 7 мм і 17 мм склала 3%, а при застосуванні упаковок з $\delta_w = 7$ мм і $\delta_w = 27$ мм – 4%.

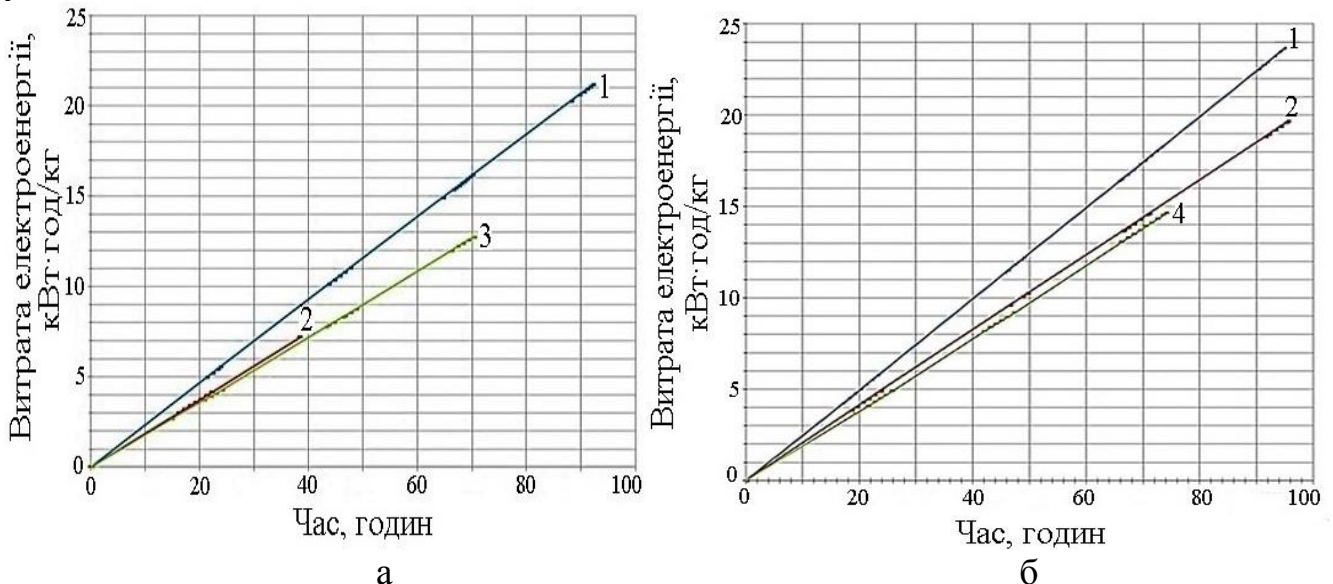


Рис. 10. Витрати енергії на 1 кг яблук при використанні упаковок різної конфігурації: а – $t_{\text{лаб.}} = 20...21$ °С; б – $t_{\text{лаб.}} = 28...30$ °С; 1 – контрольна упаковка; 2 – упаковка з водяним прошарком $\delta_w = 7$ мм; 3 – упаковка з водяним прошарком $\delta_w = 17$ мм, 4 – упаковка з водяним прошарком $\delta_w = 27$ мм

При підвищенні $t_{\text{лаб.}}$ від 20...21 °С до 28...30 °С зросли енерговитрати на 1 кг продукту, однак загальний характер їх зміни залишився незмінним. На рис. 11 показана зміна середніх питомих енергетичних витрат на 1 кг яблук за одну годину залежно

від конфігурації упаковки; також видно, що застосовувати упаковки з товщиною водяного прошарку більш, ніж 10 мм, недоцільно, через незначну економію енергії.



Рис. 11. Середні витрати електроенергії на 1 кг яблук за 1 годину при застосуванні упаковок з різною товщиною водяних прошарків:

1 – $t_{\text{лаб.}} = 20 \dots 21 \text{ } ^\circ\text{C}$; 2 – $t_{\text{лаб.}} = 28 \dots 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

При проведенні дослідів з ємностями з водяними прошарками знизилася середня амплітуда коливань температури повітря камери – від $A_{\text{кам.сер}} = 2,12 \dots 2,14 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $A_{\text{кам.сер}} = 1,87 \dots 2,11 \text{ } ^\circ\text{C}$, а компресор холодильника вмикався і вимикався рідше.

Середнє значення зміни температури плодів за 1 годину при зберіганні в контрольній упаковці $\Delta t_{\text{пр}} = 0,074 \dots 0,125 \text{ } ^\circ\text{C}$, тоді як в експериментальних ємностях $\Delta t_{\text{пр}} = 0,022 \dots 0,041 \text{ } ^\circ\text{C}$, що в 1,8...3,6 разів менше. Середня амплітуда коливань $t_{\text{пр}}$ в експериментальних ємностях також зменшилася: від $A_{\text{пр.сер.}} = 0,123 \dots 0,131 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $A_{\text{пр.сер.}} = 0,013 \dots 0,025 \text{ } ^\circ\text{C}$. Втрати маси яблук в ємностях з водяними прошарками були на 30,6...38,3% нижче, ніж в контрольних упаковках стандартної конфігурації.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Розроблено конструкції охолоджуваних ємностей з підвищеною тепловою інерційністю та акумулюючою здатністю для зберігання і транспортування продукту, які можуть бути застосовані в охолоджуваних камерах будь-якого типу.

2. Розроблена математична модель теплообміну між продуктом всередині упаковки і навколишнім середовищем при зміні температури навколишнього середовища за періодичним законом, з урахуванням теплоти дихання продукту, що дозволяє спрогнозувати характер зміни і величину коливань температури продукту всередині упаковки.

3. Проведені експериментальні дослідження з визначення впливу конструктивних характеристик упаковок на характер коливань температури плодів при зовнішніх теплових навантаженнях показали, що при застосуванні ємностей з

водяними прошарками величина підвищення температури продукту знижується у 1,8...3,2 рази, а максимальна зміна його температури – в 1,8...2,1 раз, в порівнянні з стандартними упаковками. При цьому зміна температури яблук протягом години в ємностях з водяними прошарками не перевищувала 0,2 °С, в контрольних упаковках (стандартної конфігурації) – 0,3...0,9 °С.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що при постійних періодичних коливаннях температури повітря в камері з амплітудою 8...10 °С застосування ємностей з акумулюючою здатністю дозволяє знизити коливання температури плодів більш, ніж в 2 рази (в середньому, від $\Delta t_{\text{пр.}} = 0,5...0,6$ °С до $\Delta t_{\text{пр.}} = 0,1$ °С).

5. Проведені експериментальні дослідження з визначення впливу конструктивних характеристик упаковок на енергетичні витрати показали, що в практично рівних умовах зберігання (середня температура в камері і амплітуда її коливань) при застосуванні ємностей з акумулюючою здатністю, енергетичні витрати знижуються на 17...21%.

Також знижується середня зміна температури плодів за 1 годину в 1,8...3,6 рази, зменшуються амплітуда коливань температури плодів (від $A_{\text{пр.сер.}} = 0,123...0,131$ °С до $A_{\text{пр.сер.}} = 0,013...0,025$ °С), та амплітуда коливань повітря камери за рахунок акумуляції холоду.

6. Застосування ємностей з підвищеною тепловою інерційністю та акумулюючою здатністю сприяє зниженню втрат маси продукту, більш, ніж на 31% та збереженню якості плодів за рахунок зменшення коливань їх температури, та зниження інтенсивності дихання, що призводить до уповільнення дозрівання.

7. Проведені дослідження показали, що найбільш оптимальною є товщина водяного прошарку 10 мм по периметру охолоджуваної ємності. Збільшення товщини водяного прошарку від 7 до 27 мм не призводить до значної економії енергії (3...4%), та зменшення втрат маси продукту, а також зниження коливань температури продукту: 0...0,2 °С – $\delta_w = 7$ мм; 0...0,1 °С – $\delta_w = 27$ мм. До того ж, збільшення товщини водяного прошарку призводить до значного збільшення масогабаритних показників упаковки, що в свою чергу, призводить до зниження місткості (вантажного простору) камер зберігання.

8. Застосування запропонованих ємностей з підвищеною тепловою інерційністю та акумулюючою здатністю сприяє зниженню тепловитрат при зберіганні і транспортуванні продукту, а саме – зменшенню енерговитрат, та стабілізації температури продукту при порушеннях температурних режимів, та, відповідно, збереженню якості та подовженню терміну зберігання продукту.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ

1. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Исследование характеристик структуры холодильного хозяйства системы хранения продовольственных запасов // Холодильна техніка і технологія. 2008. № 2 (112). С. 50-52. *Дисертантом проведено розгляд типових проектних рішень холодильників-плодоовочесховищ, порівняння енергетичних та економічних витрат залежно від типу холодильників.*

2. Хмельнюк М. Г., Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Значение холодильного

хозяйства в обеспечении продовольственной безопасности // Холодильна техніка і технологія. 2008. № 5 (115). С. 29-35. *Дисертантом проведено розгляд та аналіз літературних джерел щодо стану холодильного господарства країни.*

3. Чепурненко В. П., Кочетов В. П., Родионенко В. М, Томчик Е. Н. Состояние системы холодильного хранения продовольственных запасов – индикатор продовольственной безопасности // Холодильна техніка і технологія. 2008. № 3 (113). С. 75-77. *Особистий внесок: розгляд і аналіз літературних джерел за темою статті.*

4. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Хранение растительной продукции с применением новых упаковок с повышенной тепловой инерционностью // Холодильна техніка і технологія. 2010. № 6 (128). С. 53-56. *Особистий внесок: розробка конструктивного рішення ємностей з підвищеною тепловою інерційністю і акумулюючою здатністю, аналіз результатів проведених досліджень впливу охолоджуваних ємностей на характер коливань температури продукту.*

5. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Анализ проектных решений холодильников для хранения растительной продукции // Холодильна техніка і технологія. 2012. № 2 (136). С. 17-20. *Особистий внесок: класифікація планувальних рішень холодильників-плодоовочесховищ, виконаних за типовими та індивідуальними проектами залежно від їх призначення та місткості.*

6. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Результаты применения новых типов упаковок с повышенной тепловой инерционностью для хранения растительной продукции // Холодильна техніка і технологія. 2013. № 4 (144). С. 67-70. *Особистий внесок: аналіз результатів проведених досліджень впливу конструктивних характеристик стандартних упаковок і експериментальних охолоджуваних ємностей на стабільність температури продукту.*

7. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Математическая модель теплообмена в условиях периодических колебаний температуры в камере при использовании упаковок различной конфигурации // Холодильна техніка і технологія. 2013. №5 (145). С. 64-71. *Дисертантом проведено розрахунки за розробленою математичною моделлю, аналіз і узагальнення результатів досліджень, порівняння експериментальних і розрахункових даних.*

8. Томчик Е. Н., Кочетов В. П. Моделирование процессов теплообмена в условиях периодических колебаний температуры в камере при использовании упаковок различной конфигурации // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2013. Вип. 2 (79). С. 103-113. *Дисертантом проведено розрахунки за розробленою математичною моделлю, аналіз і узагальнення результатів досліджень.*

9. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Упаковки с повышенной тепловой инерционностью для хранения растительной продукции // Пищевая промышленность (Россия). 2014. № 1. С. 16-19. *Дисертантом виконано аналіз результатів досліджень з визначення впливу ємностей з акумулюючою здатністю на температуру продукту.*

10. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Особенности процессов теплообмена между упакованным продуктом и окружающей средой при периодических колебаниях температуры // Пищевая промышленность: наука и технологии (Беларусь). 2014. № 1 (23). С. 50-55. *Дисертантом проведено розрахунки за розробленою математичною*

моделлю, аналіз і узагальнення результатів досліджень, порівняння експериментальних і розрахункових даних.

11. Хмельнюк М. Г., Лагутін А. Ю., Кочетов В. П. Томчик О. М. Важливість стану холодильного господарства у забезпеченні продовольчої безпеки України // Наукові праці ОНАХТ. 2014. Вип. 45, Т. 1. С.116-121. Дисертантом виконано аналіз літературних джерел за темою статті, підготовку до публікації.

12. Томчик О. М., Хмельнюк М. Г., Гоголь М. І. Зниження енергетичних витрат при роботі холодильного обладнання під час зберігання соковитої рослинницької сировини // Холодильна техніка та технологія. 2018. Вип. 5, Т. 54. С. 23-30. Особистий внесок: аналіз результатів досліджень впливу конфігурації охолоджуваних ємностей з акумулюючою здатністю на енергетичні витрати та стабільність температури продукту.

Патенти

1. Пластиковая тара для зберігання плодоовочевої продукції: пат. на корисну модель 41517, Україна, B65D 81/24, F2529/00 / Томчик О. М.; ОДАХ; № u200814732 заявл. 22.12.08; опубл. 25.05.2009, бюл. № 10. 2 с. Особистий внесок: розроблено конструкцію охолоджуваної ємності з підвищеною тепловою інерційністю та акумулюючою здатністю.

2. Контейнер для зберігання плодоовочевої продукції: пат. на корисну модель 44897, Україна, A01F 25/00, B65D 85/34 / Томчик О. М.; ОДАХ. № u200900999; заявл. 09.02.09; опубл. 26.10.2009, бюл. № 20. 3 с. Дисертантом розроблено конструкцію ємності з підвищеною тепловою інерційністю та акумулюючою здатністю.

3. Пластиковая тара для зберігання плодоовочевої продукції: пат. на корисну модель 48587, Україна, B65D 81/24, F25D 29/00/ Томчик О. М.; ОДАХ. № u200909923; заявл. 29.09.2009; опубл. 25.03.2010, бюл. № 6, 2 с. Дисертантом розроблено конструкцію ємності з акумулюючою здатністю.

4. Спосіб зберігання сільськогосподарських харчових продуктів або сировини: пат. на корисну модель 100447, Україна, A01F 25/14 (2006.01), B65D 85/00, F25D 3/00 / Томчик О. М., Савін С. М., Кочетов В. П.; ОНАХТ. № u201501050; заявл. 10.02.2015, опубл. 27.07.2015, бюл. №14, 5 с. Дисертантом розроблено спосіб зберігання продукту з використанням охолоджуваних ємностей з акумулюючою здатністю.

5. Стояковий піддон для сільськогосподарських харчових продуктів або сировини: пат. на корисну модель 100448, Україна, A01F 25/00, B65D 6/10 (2006.01), F25D 1/00, F25D 3/00 / Томчик О. М., Савін С. М., Кочетов В. П.; ОНАХТ. № u201501051, заявл. 10.02.2015, опубл. 27.07.2015, бюл. № 14. 8 с. Дисертантом розроблено конструктивне рішення стоякового піддону з підвищеною тепловою інерційністю та акумулюючою здатністю.

6. Спосіб зберігання сільськогосподарських харчових продуктів або сировини: пат. на корисну модель 118674, Україна, F25D 3/00, B65D 85/00, A01F 25/14 (2006.01) / Томчик О. М.; ОНАХТ. № u201613596, заявл. 29.12.2016, опубл. 28.08.2017, бюл. № 16. 7 с. Особистий внесок: розроблено спосіб зберігання продукту з застосуванням охолоджуваних ємностей з акумулюючою здатністю.

Публікації апробаційного характеру

1. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Вопросы энерготехнологического аудита и сертификации объектов холодильного хозяйства системы хранения продовольственных запасов Украины. Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції (19-21 вересня 2007 р., Одеса, ОДАХ). Одеса, 2007. С. 72-73. *Дисертантом виконано розгляд та аналіз літературних джерел.*

2. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Анализ существующих технологий хранения растительной продукции и перспективы применения новых видов упаковки с повышенной тепловой инерционностью. Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції (22-24 вересня 2009 р., Одеса, ОДАХ), Одеса, 2009. С. 167-168. *Особистий внесок: розгляд і аналіз літературних джерел, запропоновано конструкцію охолоджуваної ємності для стабілізації температури продукту.*

3. Томчик Е. Проблемы энергосбережения в сфере хранения растительной продукции. Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: збірник тез доповідей науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (28 квітня 2009 р, Одеса, ОДАХ). Одеса, 2009. С. 10-11. *Особистий внесок: розгляд та аналіз літературних джерел за темою доповіді.*

1. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Изучение влияния конструктивных характеристик упаковки на тепловую инерцию при поддержании температурно-влажностного режима в объеме контейнеров с фруктами при нарушениях регламентируемого температурно-влажностного режима хранения. Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції. Частина 2 (14-16 вересня 2011 р., Одеса, ОДАХ). Одеса, 2011. С. 151-153. *Особистий внесок: аналіз результатів проведених досліджень впливу конструктивних характеристик упаковок на характер зміни температури продукту.*

2. Кочетов В. П., Томчик О. М. Роль холодильного хозяйства системы зберігання продовольчих запасів України у забезпеченні продовольчої безпеки. Сталий розвиток та штучний холод: збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю ОДАХ (10-12 жовтня 2012, Одеса, ОНАХТ). Одеса, 2012 С. 182-187. *Особистий внесок: розгляд, аналіз літературних джерел і статистичних даних щодо стану холодильного господарства країни.*

3. Кочетов В. П., Томчик Е. Н. Применение упаковок с повышенными показателями тепловой инерции для длительного хранения плодовоощной продукции. Energy of Moldova – 2012. Regional aspects of Development: материалы международной конференции (4-6 october, 2012, Chisinau, Republic of Moldova). Chisinau, 2012. С. 320-323. *Дисертантом викладені результати досліджень впливу конструктивних характеристик упаковок на характер зміни температури продукту.*

4. Дидык Н. Н., Томчик Е. Н. Влияние теплозащитных свойств упаковки на потери влаги при холодильном хранении растительной продукции. Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології: збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів (22 квітня 2013 р., Одеса, ОНАХТ). Одеса, 2013. С. 49-50. *Дисертантом розглянуто*

доцільність застосування ємностей з акумулюючою здатністю для зберігання і транспортування продукту.

5. Томчик Е. Н., Кочетов В. П. Результаты применения новых типов упаковок с повышенной тепловой инерционностью для хранения растительной продукции. Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції (10-12 вересня 2013 р., Одеса, ОНАХТ). Одеса, 2013. С. 120-122. *Дисертантом виконано аналіз результатів проведених досліджень впливу конструктивних характеристик упаковок на характер зміни температури та якість продукту.*

6. Томчик Е. Н., Кочетов В. П. Упаковки с повышенной тепловой инерционностью для длительного хранения растительных продуктов. Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції. (11-12 вересня 2015 р., Одеса, ОДАХ). Одеса, 2015. С. 31-32. *Особистий внесок: аналіз результатів проведених досліджень впливу розроблених ємностей з акумулюючою здатністю і підвищеною тепловою інерційністю на характер коливань температури продукту при зберіганні.*

10. Томчик О. М., Хмельнюк М. Г., Гоголь М. І. Підвищення енергетичної ефективності роботи холодильного обладнання при зберіганні соковитої рослинницької сировини. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції (18-19 жовтня 2018 р., Миколаїв, НУК ім. адмірала Макарова). Миколаїв, 2018. С. 536-538. *Особистий внесок: аналіз результатів досліджень впливу ємностей з акумулюючою здатністю і підвищеною тепловою інерційністю на енергетичні витрати при зберіганні продукту.*

11. Томчик О. М., Хмельнюк М. Г., Гоголь М. І., Ольшевський В. С. Ефективність зберігання соковитої рослинницької продукції в упаковках з підвищеною тепловою інерційністю та акумулятивною здатністю. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції (18-19 жовтня 2018 р., Миколаїв, НУК ім. адмірала Макарова). Миколаїв, 2018. С. 545-547. *Особистий внесок: аналіз результатів досліджень застосування ємностей з акумулюючою здатністю на стабільність температури продукту.*

АНОТАЦІЯ

Томчик О. М. Вдосконалення засобів зниження тепловитрат малих охолоджуваних об'єктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування». – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2019.

В роботі представлені результати досліджень перспектив застосування охолоджуваних ємностей з підвищеною тепловою інерційністю та акумулюючою здатністю для стабілізації температури продукту і зниження енергетичних витрат під час зберігання і транспортування. Охолоджувана ємність виконана з полімерного матеріалу, з подвійними стінками, прошарки між якими по всьому периметру заповнені рідиною з високою тепловою інерційністю.

Запропоновано математичну модель теплообміну між продуктом в упаковці

упаковки і навколишнім середовищем при зміні температури навколишнього середовища за періодичним законом, з урахуванням теплоти дихання продукту, яка дозволяє оцінити вплив конструктивних особливостей упаковок на стабільність підтримання температури продукту.

Розроблено методику проведення досліджень та виготовлені експериментальні стенди для визначення впливу упаковок різної конфігурації – стандартних та експериментальних (з водяними прошарками), на енергетичні витрати і характер коливань температури продукту.

Представлені результати експериментальних досліджень ємностей з акумулюючою здатністю (з водяними прошарками). Проведено порівняння характеру енергетичних витрат і впливу коливань температури повітря в охолоджуваному просторі камери на зміну температури продукту при застосуванні упаковок різної конфігурації.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що при застосуванні упаковок з акумулюючою здатністю за рахунок зменшення коливань температури плодів (яблук) до $\leq 0,2$ °C, зменшуються витрати енергії на 17...21%. При цьому оптимальна товщина водяних прошарків становить 10 мм.

Пропонований засіб зниження енерговитрат и захисту продукту від температурних коливань може бути використаний незалежно від типу охолоджуючих систем і будівельних конструкцій камер і термінів їх експлуатації.

Ключові слова: акумуляція холоду, енергетична ефективність, стабілізація температури продукту, ємність з підвищеною тепловою інерційністю, рідинні (водяні) прошарки.

ABSTRACT

Tomchyk O. M. Improving the techniques of reducing heat loss for small cooled objects. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a candidate of science degree by specialty 05.05.14 – Refrigerating, vacuum and compressor technique, air-conditioning systems. – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2019.

The thesis represents study results for prospects of cooled tanks (packages) with high thermal inertia and storage capacity use intended for product temperature stabilization and energy consumption reduction during cold product storage and its transportation. The cooled tank (package) is made from a polymeric material, with double walls, using liquid layers which are placed between walls with high thermal inertia along the entire perimeter.

A mathematical model of heat exchange between the product in the package and the environment when the ambient temperature varies according to the periodic (non-sinusoidal) law, taking into account the heat rejected to the environment from a product «breath» is developed. Mathematical model is intended to evaluate the influence of the design features of the packages on the stability of maintaining the product temperature.

A research methodology is developed and pilot units are made and tested to determine the design characteristics impact of various configurations package – standard and experimental (with water layers), on energy consumption reduction during cold storage and on the nature of product temperature fluctuations.

The results of the tested pilot units with cool thermal energy storage (water layers) are presented. A comparison of the energy consumption reduction nature and the effect of air temperature fluctuations in the cooled space of the chamber on the product temperature change when packages using of various configurations are performed.

On the basis of full-scale experiment, it was found, using packages with high thermal inertia due to reducing fruit (apples) temperature fluctuations for cold storage up to $\leq 0,2$ °C, energy consumption is reduced by 17...21%. The optimum thickness of the water layers is 10 mm.

The proposed techniques of energy consumption reduction and product protecting from temperature fluctuations can be used regardless of the refrigerated systems type, cold rooms design and its service life.

Keywords: cool thermal energy storage, energy efficiency, product temperature stabilization, package with increased thermal inertia, liquid (water) layers.

Підписано до друку 25.05.2019 р.
Формат 60х84/16. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Зам. №98. Тираж 100 прим.

Надруковано у копіювальному центрі ФОП Яковлєв М. Ю.
Свідоцтво В02 № 447881 від 17.03.2003 р.
м. Одеса, вул. Пастера, 52.
Тел.: (048) 798-36-96