

Автореферат  
№ 75

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**ЖИХАРЄВА НАТАЛІЯ ВІТАЛІВНА**



УДК 621.565.58;621.560

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ  
ОХОЛОДЖЕННЯ ПЛОДОВОЧЕСХОВИЩ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса 2013

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Навчально-науковому інституті холоду, кріотехнологій та енергетики Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) Міністерства освіти і науки (МОН) України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри холодильних машин і  
установок Одеської національної академії  
харчових технологій МОН України  
**Хмельнюк Михайло Георгійович**

**Офіційні опоненти:**

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

доктор технічних наук, професор  
кафедри теплогазопостачання і вентиляції  
національного університету «Львівська  
політехніка» МОН України  
**Лабай Володимир Йосифович**

Захист дисертації відбудеться « 10 » червня 2013 р. в ауд. 108 об 11<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 при Одеській національній академії харчових технологій: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

Дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОНАХТ за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

...» квітня 2013 р.

Узс

-Уос

В.І. Мілованов

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.**

Актуальність розв'язання проблем скорочення втрат продукції та енерговитрат під час холодильного зберігання харчових продуктів (особливо плодоовочевої продукції) обумовлена кризовими явищами в цій області.

Аналіз найраціональніших режимів експлуатації на основі математичних моделей та існуючих технологій холодильного зберігання плодоовочевої продукції приводить до висновку, що вони здебільшого не забезпечують раціональних умов для тривалого і ефективного зберігання продукції в штабелі.

Знаходження оптимальних режимів холодильного зберігання рослинної продукції залежить від розв'язання комплексу взаємопов'язаних задач, що включають дослідження теплопередачі через огороження і тепломасообміну в штабелі продукції, інваріантні розрахунки охолоджувальної системи і системи повітророзподілення.

Проблеми скорочення втрат продукції та витрат під час холодильного зберігання харчових продуктів (особливо плодоовочевої продукції), зменшення питомих енерговитрат і підвищення рентабельності переробних підприємств, зумовлені кризовими явищами в цій області і новими принципами господарювання в умовах ринку, є вкрай необхідними та своєчасними, що підтверджує актуальність розглянутих проблем.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконана відповідно з програмою фундаментальних і пошукових досліджень, які відповідають Постанові Кабінету Міністрів України від 24.12.01р. № 1716., «Ресурсозберігаючі та енергоефективні технології виробництва, зберігання та переробки сільськогосподарської продукції», Договору НДКТИХТ «Агрохолод» з Головним управлінням організації наукових досліджень та зв'язків з УААН Міністерства Агропромислового комплексу України «Розробити та впровадити оптимізовані енерго- та ресурсозберігаючі системи охолодження» на 1999–2002рр.; (Протокол №14 від 21.12.1998р., № державної реєстрації 0199U001689), Постанові Кабінету Міністрів від 22.02.2001 р. №2274-111 (2274-14) «Енергетична стратегія України на період до 2030 року», Наказу МОН та МС України №1066/609 «Про затвердження основних наукових напрямків та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природних, технічних і гуманітарних наук на 2009-2013 роки».

Дослідження проводили в рамках пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки «Новітні ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та АПК», а також згідно із законом України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки та техніки» від 11.07.2001, №2623-III, Галузевої науково-технічної програми сталого розвитку побутової техніки в Україні на 2006-2011 роки (наказ Мінпромполітики України від 03.03.06 № 85, Програми ООН «UNIDO Cleaner Production Programme» по зниженню енерго- та ресурсоспоживання українськими підприємствами на 10-30%, яка діє з 2007 року. Виконання роботи входило в плани НДР ОДАХ.

xv 1070

ІНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
бібліотека

ГАЛУЗЕВИЙ

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є оптимізація системи охолодження плодоовочесховищ з мінімізацією приведених витрат на зберігання плодоовочевої продукції.

**Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:**

1. Проаналізувати існуючі шляхи оптимізації енерго- та ресурсозберігаючої системи охолодження та режимів роботи холодильної установки плодоовочесховищ.
2. Провести комплексну оптимізацію енерго- та ресурсозберігаючої системи охолодження та режимів роботи холодильної установки плодоовочесховищ.
3. Розробити термoeкономічну модель оптимізації режимів роботи холодильної установки плодоовочесховищ, в якій температурний напір та зміна температур середовищ, що охолоджується або нагрівається в одному теплообмінному апараті, використаний як залежні змінні, та яка враховує особливості конструктивних елементів повітроохолодників для плодоовочесховищ з урахуванням технологічних та економічних критеріїв оптимальності.
4. Розробити метод оптимізації конструктивних елементів повітроохолоджувачів для плодоовочесховищ, застосовуючи комплексні технологічні та економічні критерії, та провести розрахунок за розробленими комп'ютерними моделями елементів охолоджувальної системи.
5. Розробити математичну модель процесу тепломасообміну і формування температурно-вологісних полів у штабелі з плодоовочевою продукцією під час активного вентилявання та визначити оптимальні параметри холодильного зберігання плодоовочевої продукції.
6. Визначити взаємозв'язки між параметрами: навколишнього середовища у камері, штабелі і режимом роботи системи охолодження з врахуванням впливу витрати повітря на величину усушки продукту за різних умов його зберігання.
7. Перевірити адекватність термoeкономічної моделі елементів охолоджувальної системи реальним процесам під час зберігання плодоовочевої продукції.

**Об'єктом дослідження** є система охолодження плодоовочесховища для зберігання продукції.

**Предметом дослідження** є показники енергетичної ефективності системи охолодження плодоовочесховищ та процеси тепломасообміну і формування температурно-вологісних полів у штабелі з плодоовочевою продукцією за активного вентилявання.

**Методи дослідження:** метод термoeкономічного аналізу, математичне моделювання тепломасообміну, чисельні методи та методи оптимізації, комп'ютерні експерименти, експерименти з визначенням показників економічної ефективності холодильної установки, співставлення результатів розрахунку з результатами експерименту.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в наступному:

- Розроблено термoeкономічну модель оптимізації режимів роботи холодильної установки плодоовочесховищ, в якій вперше враховані особливості конструктивних елементів повітроохолоджувачів з урахуванням технологічних та економічних критеріїв оптимальності та в якій температурний напір та зміна температури середовищ, що охолоджується або нагрівається, в одному теплообмінному апараті використанні як залежні змінні. За допомогою розробленої моделі визначені раціональні характеристики теплообмінних апаратів;
- Розроблено математичну модель процесів тепломасообміну в штабелі рослинної продукції під час холодильного зберігання в якій вперше врахованна залежність усушки продукту від величини витрати повітря для системи розподілу повітря з активною вентиляцією, що дало змогу визначити оптимальні параметри зберігання плодоовочевої продукції;
- Вперше розроблений метод оптимізації конструктивних елементів повітроохолоджувачів плодоовочесховищ за використання принципу модульної архітектури, в якому застосовано виведені комплексні технологічні та економічні критерії з варіюванням геометричних характеристик, що дало підставу для розробки оптимального повітроохолоджувача;
- Вперше проведена комплексна оптимізація системи охолодження плодоовочесховищ, яка базується на визначенні мінімуму приведених витрат, якому відповідають раціональні характеристики теплообмінних апаратів, що сприяє процесу проектування енергоощаджуваної системи охолодження.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджуються коректною постановкою завдань і перевіркою адекватності комплексної моделі термoeкономічної ефективності системи охолодження плодоовочесховищ, використанням сучасних методів оптимізації та термoeкономічного аналізу.

**Практичне значення отриманих результатів:** використання створеного програмного забезпечення для розробки оптимізованої системи охолодження плодоовочесховищ. На основі теплофізичних досліджень розроблений науково-обґрунтований метод побудови ефективної технології холодильного зберігання плодоовочевої продукції. Результати цих досліджень прийняті НДКПХТТ «Агрохолод» для розробки і впровадження у виробництво оптимізованих систем охолодження для холодильників – плодоовочесховищ різноманітного призначення, місткості і кліматичних умов регіону.

За результатами оптимізаційних розрахунків розроблені та виготовлені НДКПХТТ «Агрохолод» повітроохолоджувачі для експериментальної камери в плодоовочесховищі місткістю 100 т.

Ці результати використовуються в розроблених автором лекційних курсах «Оптимізація обладнання систем кондиціонування повітря», «Системи життєзабезпечення на транспорті», курсовому і дипломному проектуванні під час навчання студентів за спеціальністю 05060403 «Холодильні машини та установки».

**Особистий внесок** здобувача полягає у визначенні наукових задач, розробці методик досліджень, написанні програм розрахунку, аналізі та узагальненні

отриманих даних, формуванні висновків та рекомендацій, підготовці матеріалів до публікацій. Особистий внесок здобувача підтверджено поданими документами та науковими публікаціями.

**Апробація роботи.** Основні результати досліджень були представлені і обговорювалися на науково-технічній конференції «Людина та навколишнє середовище – проблеми безперервної екологічної освіти в вузах», Одеса, 1996; на Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології», Одеса, 2001; 2-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2002; 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2003; 4-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2005; 5-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2007; 6-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2009; 7-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2011; 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, 2012; 8-й Міжнародній науково-технічній конференції, яка присвячена 90-річчю ОДАХ «Сталий розвиток і шугучий холод», Одеса, 2012.

**Публікації.** Основні наукові і прикладні результати дисертації представлені в 21 публікації, з яких 9 опубліковані у фахових науково-технічних журналах і викладено в 1-у електронному журналі, 10 опубліковано у формі доповідей і тез у збірниках наукових Міжнародних і Українських науково-практичних конференцій та патенту на винахід.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури, що складається з 202 джерел. Робота викладена на 191 сторінки друкованого тексту, включаючи 173 сторінки основного тексту, в тому числі 33 рисунка та 15 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульована мета та завдання досліджень, відмічено зв'язок роботи з науковими програмами, приведена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі проведено огляд патентної і науково-дослідної літератури та зроблений аналіз вибору оптимальних режимів роботи теплообмінних апаратів холодильних машин та установок, сучасного стану моделювання та оптимізації плодоовочесховищ з врахуванням вибору системи охолодження, впливу різних чинників на втрати і якість плодоовочевої продукції за тривалого зберігання.

Проаналізовані джерела іноземної літератури, в яких викладено застосування ексергетичного методу термодинамічного аналізу в різних галузях науки і техніки.

Огляд літератури показує, що отримані в наукових працях результати вказують на можливість існування режимів, за яких температура теплоносія, що виходить з конденсатора, вища за температуру конденсації, що в реальних умовах, за

існуючих конструкцій водяних конденсаторів, неможливо. Ці параметри заставляють засумніватись у ступені адекватності моделі і реального об'єкту. Параметри, що оптимізуються: температурний напір  $\Theta_k$  і підігрівання води в конденсаторі  $\Delta T_w$ , температурний напір  $\Theta_0$  і охолодження повітря в повітроохолоджувачі  $\Delta T_a$  розглядалися як незалежні змінні.

Розглянуті питання оптимізації повітроохолоджувачів. На якість порівняльних розрахунків вплинули орієнтовні оцінки собівартості поверхонь і наближені методики з розрахунку теплових і аеродинамічних характеристик ребристих елементів в умовах інеутворення. Оптимізація повітроохолоджувачів та режимів холодильної установки здійснювалась незалежно одне від одного.

Проведений аналіз впливу різних чинників (температури, вологості повітря, складу повітря у сховищі, рухомості повітря) на втрати і якість плодоовочевої продукції за тривалого зберігання та впливу на ці чинники різних факторів.

На підставі аналізу сучасних тенденцій та впливу на ці чинники різних факторів та ресурсозберігаючої системи охолодження плодоовочесховищ сформульована низка завдань з підвищення ефективності, які підлягають комплексному вирішенню.

Другий розділ присвячено розробці комплексної моделі холодильного зберігання плодоовочевої продукції. Ця модель враховує не тільки теплофізичні аспекти, але також і фактори з мінімізації змінної частини приведених витрат, які пов'язані з витратами енергії та води.

Цільовою функцією оптимізації системи охолодження обрана мінімізація приведених витрат з забезпеченням найменших природних втрат продукції.

Комплексна модель холодильного зберігання плодоовочевої продукції включає:

- визначення оптимальних параметрів холодильного зберігання плодоовочевої продукції;
- врахування впливу витрати повітря на величину усушки продукту за різних умов його зберігання;
- визначення економічно-доцільної товщини шару теплоізоляції за активного вентилявання штабеля плодоовочевої продукції в умовах динамічно змінюваної температури зовнішнього повітря;
- визначення теплостійкості огорожувальних конструкцій з врахуванням теплозахисної сорочки;
- оптимізацію конструктивних елементів повітроохолоджувачів для плодоовочесховищ із застосуванням комплексних критеріїв;
- статичну оптимізацію режимів роботи холодильної установки на підставі розробленої термoeкономічної моделі.

Проведено дослідження оптимальних режимів роботи холодильної установки з використанням методу термoeкономічного аналізу. Було розглянуто роботу одноступеневої холодильної установки безпосереднього випаровування з проточною системою водопостачання (рис. 1), термoeкономічну модель якої зображено на рис. 2. Оптимізація режимів роботи цієї установки проводилась методом термoeкономічного аналізу, розробленим в галузі холодильної техніки

американським вченим М. Тібус та продовжений в роботах В.В. Оносовського.

Розглянуто оптимізацію процесів охолодження, яка зводилась до визначення мінімального значення приведених витрат з урахуванням пливкового зволожувача.

Термoeкономічна модель холодильної установки, зображена у вигляді послідовно з'єднаних трьох зон. Зона 1 включає компресор з електродвигуном, конденсатор, насос охолоджувальної води з електродвигуном і регулювальний вентиль; зона 2 – випарник для охолодження проміжного холодоносія та насос із електродвигуном, що забезпечує циркуляцію холодоносія; зона 3 – охолоджувальні пристрої з вільним або примусовим рухом повітря та вентилятор із електродвигуном, а також зволожувальні пристрої та насос із електродвигуном.

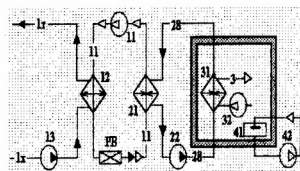


Рис. 1. Схема одноступеневої холодильної установки

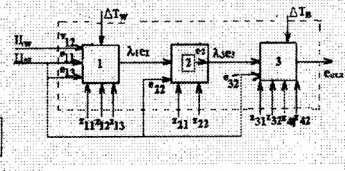


Рис. 2. Термoeкономічна модель одноступеневої холодильної установки

У прийнятому варіанті схеми необхідна холодопродуктивність установки має бути забезпечена за прийнятого набору стандартного устаткування. При цьому число одиниць відповідного обладнання, що забезпечує оптимальну експлуатацію холодильної установки, повинно бути визначено на підставі термoeкономічного аналізу

Від зовнішнього джерела до системи підводиться енергія (ексергія) із ціною  $\Pi_{\text{ел}}$  (грн/кВт-годину) для приводу електродвигуна компресора  $e_{11}$ , електродвигуна насоса охолоджувального середовища  $e_{13}$ , електродвигуна насоса проміжного холодоносія  $e_{22}$ , електродвигуна вентилятора повітроохолоджувача  $e_{32}$ , електродвигуна насоса зволожувача  $e_{42}$ . Від зовнішнього джерела підводиться також охолоджена вода в кількості  $V_{12}$ , м<sup>3</sup>/годину, ціною  $\Pi_w$ , грн/м<sup>3</sup>. У середині системи передається ексергія із зони 1 у зону 2 –  $e_{11}$ , із зони 2 у зону 3 –  $e_{22}$ , з ціною одиниці ексергії  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ . У результаті роботи системи має бути отримана обрана холодопродуктивність  $e_{\text{охл}}$ .

Критерієм оптимізації обрані приведені витрати (ПВ), які для розглянутого випадку можуть бути описані виразом

$$\text{ПВ} = [\Pi_{\text{ел}} \cdot (e_{11} + e_{13} + e_{32} + e_{22} + e_{42}) + \Pi_w \cdot V_{12} + z_{11} + z_{12} + z_{13} + z_{21} + z_{22} + z_{31} + z_{32} + z_{41} + z_{42}] \cdot \tau_p \quad (1)$$

де  $V_{12}$  – щосекундна витрата води в конденсаторі 12;  $e_{11}$  – ексергія, що споживається електродвигуном компресора 11;  $e_{13}$  – ексергія, що споживається електродвигуном водяного насоса 13;  $e_{22}$  – ексергія, що споживається

електродвигуном вентилятора 22;  $e_{32}$  – ексергія, що споживається електродвигуном вентилятора повітроохолоджувача;  $e_{42}$  – ексергія, що споживається електродвигуном насоса зволожувача;  $z_{11}$ ,  $z_{12}$ ,  $z_{13}$ ,  $z_{31}$ ,  $z_{32}$ ,  $z_{41}$ ,  $z_{42}$  – нормативні відрахування від вартості та витрати на ремонт і експлуатацію компресора 11, конденсатора 12, водяного насоса 13, охолоджувача 31, вентилятора 32, зволожувача 41, насосу з електродвигуном для зволожувача 42, відповідно,  $\tau_p$  – кількість робочих годин у рік. Для отриманого значення  $Q_{\text{охл}}$

$$\text{ПВ} = \text{ПВ} \cdot (\Delta T_w, \Delta T_n). \quad (2)$$

з обмеженнями:  $\Theta_k = f(\Delta T_w)$  та  $\Theta_0 = f(\Delta T_n)$

тут  $\Theta_k$ ,  $\Theta_0$  – температурні напори в конденсаторі та охолоджувачі, які є залежними змінними від  $\Delta T_w$  та  $\Delta T_n$ ,  $\Delta T_w$  – перепад температур у конденсаторі;  $\Delta T_n$  – перепад температур повітря в повітроохолоджувачі.

Виходячи з того, що експлуатаційні та капітальні витрати, як відомо, мають протилежний вплив на загальну величину витрат, обрана цільова функція дозволяє знайти оптимальне значення режиму роботи даної холодильної установки.

Термодинамічна модель описана залежностями:

$$\begin{aligned} z_{11} &= Z_{11}(e_1, \Theta_k, \Delta T_w); & z_{21} &= Z_{21}(e_2, \Theta_0, \Delta T_n); \\ z_{12} &= Z_{12}(e_1, \Theta_k, \Delta T_w); & z_{22} &= Z_{22}(e_3, \Delta T_w); \\ z_{31} &= Z_{31}(e_{\text{охл}}, \Theta_0, \Delta T_n); & z_{32} &= Z_{31}(e_{\text{охл}}, \Delta T_n); \\ z_{41} &= Z_{41}(e_{\text{охл}}, \Theta_0, \Delta T_n); & z_{42} &= Z_{42}(e_{\text{охл}}, \Delta T_n); \\ e_{11} &= E_{11}(e_1, \Theta_k, \Delta T_w); & e_{13} &= E_{13}(e_1, \Theta_k, \Delta T_w); \\ e_{22} &= E_{22}(e_3, \Theta_0, \Delta T_n); & z_{13} &= Z_{13}(e_1, \Theta_k, \Delta T_w); \\ e_{31} &= E_{31}(e_{\text{охл}}, \Theta_0, \Delta T_n); & e_{32} &= E_{13}(e_{\text{охл}}, \Delta T_n); \\ e_{41} &= E_{41}(e_{\text{охл}}, \Theta_0, \Delta T_n); & e_{42} &= E_{13}(e_{\text{охл}}, \Delta T_n); \\ v_{12} &= V_{12}(e_2, \Theta_k, \Delta T_w); \end{aligned} \quad (3)$$

Величини потоків ексергії, яка зв'язує зони:

$$\begin{aligned} e_1 &= E_1(e_{\text{охл}}, \Theta_k, \Delta T_w); \\ e_3 &= E_3(e_{\text{охл}}, \Theta_0, \Delta T_n); \\ e_{\text{охл}} &= E_0(Q_{\text{охл}}, T_{\text{охл}}, T_{\text{ос}}) \end{aligned} \quad (4)$$

В рівняннях (3), (4)  $e_{ij}$  та  $E_{ij}$  характеризують одне і те саме, але  $e_{ij}$  – кількість ексергії, а  $E_{ij}$  – її функціональна залежність. Те саме відноситься до  $z_{ij}$  та  $Z_{ij}$ ,  $v_{12}$  та  $V_{12}$ .

Система рівнянь (3), (4) була розв'язана методом послідовних наближень Нелдера – Міда, за яким виведені формули для визначення складових критерія оптимізації (1).

Оптимізація режиму роботи холодильної установки є завершальним етапом комплексної оптимізації системи охолодження плодоовочесховищ.

За даних, які входять на цьому етапі оптимізації, виведені математичні залежності для розрахунку всіх складових цільової функції, з урахуванням ексергетичних витрат, як критерію термодинамічної ефективності. Визначені проміжні вартості ексергії між зонами.

Для оптимізації холодильної установки врахований оптимальний повітроохолоджувач, який визначений за модульним принципом. Як константа

модуля обрана загальна довжина пучка труб, а не загальна зовнішня поверхня, при цьому залишається константою для даного діаметра труби внутрішня поверхня, а зовнішня змінюється за варіації кроку оребрення

Алгоритм дозволяє проводити оптимізацію за приведеними до загального

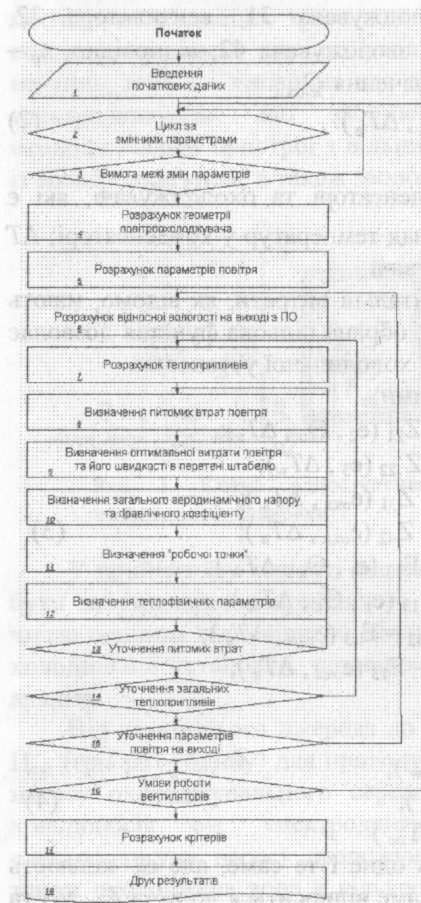


Рис. 3. Блок-схема алгоритму оптимізації повітроохолодника плодовоовочесховищ

За чисельного експерименту варіювався такий набір змінних параметрів: крок оребрення, крок труб, кількість рядів труб з більшим кроком ребер; кількість рядів труб з меншим кроком ребер; загальна кількість рядів труб в напрямку руху повітря; кількість рядів труб по фронту.

Алгоритм розрахунку повітроохолодника був побудований на базі вкладених циклів, в яких з похибкою менше 0,1% ітераційно визначались температура поверхні інєю, температура та відносна вологість повітря на виході з секцій, коефіцієнт вологовипадіння, питомий тепловий потік та залежні від них коефіцієнти тепловіддачі та теплопередачі. З такою самою похибкою (0,1%) у

теплого навантаження  $Q_0$ , яке відповідає найспекотнішому періоду року такими частковими (технологічними)  $Q_0/F$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_0/N$ , Вт/Вт;  $Q_0/M$ , Вт/кг та та комплексними критеріями:

$$\frac{(\lambda_T + N \cdot \tau_p \cdot C_{ел})}{Q_0}, \text{ грн/Вт}, \quad (5)$$

де:  $C_{ел}$  – ціна 1 кВт години електроенергії, грн;  $\lambda_m$  – ціна повітроохолодника розраховувалась для кожного варіанту залежно від маси труб з урахуванням інших витрат за статтями кошторису;  $\tau_p$  – кількість робочих годин у рік.

$$(\lambda_T + N \cdot \tau_p \cdot C_{ел}), \text{ грн}, \quad (6)$$

де:  $A$  – доля амортизації за цикл зберігання ( $A = 0,12$ );  $C_i$  – вартість продукції, втраченої внаслідок усушки, грн;  $\tau_s$  – термін зберігання, годин ( $\tau_s = 4830$  год).

Для проведення чисельного експерименту був використаний авторський метод, в якому спочатку проводиться розрахунок гідравлічної характеристики модуля, а потім, у результаті одночасного розв'язання рівнянь, що описують гідравлічні характеристики варіанту компоновки модуля та вентилятора, знаходять «робочу точку» на їх перетині, якій відповідають конкретні значення споживаної вентилятором електричної потужності, його коефіцієнта корисної дії.

зовнішньому циклі визначалась холодопродуктивність, розрахована через коефіцієнт теплопередачі та середньоінтегральну різницю температур холодильного агента та повітря.

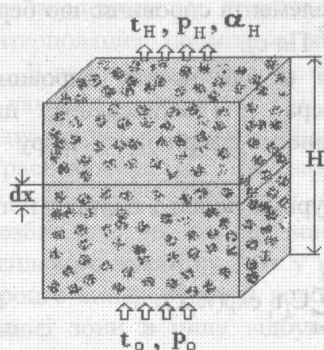


Рис. 4. Виділення елементарного горизонтального шару за висотою штабеля

Математичний опис процесів тепло- і масообміну під час зберігання плодовоовочевої продукції базується на рівняннях теплового і

матеріального балансу для елементарного прошарку штабеля продукції. Виділивши за висотою штабеля елементарний горизонтальний шар висотою  $dx$  (рис. 4), складене для нього рівняння теплового балансу (нехтуючи теплоприпливами до бічної поверхні штабеля), що встановлює рівність між теплом, втраченим продукцією в цьому прошарку за одиницю часу, і теплом, набутих повітрям за той самий час за безпосереднього підвищення його температури і вологовмісту завдяки проникненню в нього пари в результаті випаровування води з поверхні продукції.

Математична модель процесів тепло- та масообміну в штабелі продукції з урахуванням зони відпотівання описується такою системою диференціальних рівнянь:

$$\lambda_0 \frac{d^2 t_s}{dx^2} + \rho_n q_0 \exp(b_s t_s) = \alpha F_n (t_s - t_r) + \beta_p \varepsilon_f r F_n (p'' - p), \quad (7)$$

$$\varepsilon C_p \rho_r V \frac{dt_r}{dx} = \alpha F (t_s - t_r). \quad (8)$$

$$\frac{0,622}{P_B} \frac{dp}{dx} = \beta_p \frac{\varepsilon_f F_n}{\varepsilon V \rho_r} (p'' - p) \quad (9)$$

Граничні умови на вході та виході зі штабеля мають вигляд:

$$\text{на вході - за } x = 0: \quad t_r = t_0, \quad \lambda_0 \frac{dt_s}{dx} = \alpha \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (t_s - t_0), \quad p = p_0; \quad (10)$$

$$\text{на виході - за } x = h: \quad \lambda_0 \frac{dt_s}{dx} = \alpha \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (t - t_s), \quad (11)$$

тут  $q_0$  – питома теплота дихання за  $0^\circ\text{C}$ , Вт/кг;  $p$  – парціальний тиск водяної пари, Па;  $p''$  – тиск насиченої водяної пари, Па,  $t_s$ ,  $t_r$  – температура сировини та повітря,  $^\circ\text{C}$ ;

$P_5$  – барометричний тиск, Па;  $\lambda_0$  – ефективна теплопровідність насипу сировини, Вт/(м·К);  $\rho$ , – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – теплоємність повітря за сталого тиску, Дж/(кг·К);  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\varepsilon$  – пористість насипу сировини;  $\varepsilon_f$  – масообмінна характеристика, що є часткою поверхні елемента сировини, що бере участь у масообміні;  $\beta_p$  – коефіцієнт масовіддачі, кг/(м<sup>2</sup>·Па·с).

Коефіцієнти теплопровідності  $\lambda_0$  та тепловіддачі  $\alpha$  для насипу сировини визначаються відповідно до формул Зенера-Бауера і Гнелинського, що експериментально встановлені для щільно упакованого сферичного шару з рухомих газом.

Розв'язання задачі (7) - (9) про розподіл температурних полів і парціального тиску пари у вентильованому повітрі має вигляд:

$$t_i(x) = t_* + \sum_{i=1}^4 C_i \exp(\lambda_i x), \quad t_s(x) = t_* + \sum_{i=1}^4 C_i t_i \exp(\lambda_i x),$$

$$p(x) = p_* + \sum_{i=1}^4 C_i p_i \exp(\lambda_i x). \quad (12)$$

Тут сталі  $C_i$ ,  $t_i$ ,  $p_i$  визначались з умов на вході в штабель, а  $t^*$  та  $p^*$  характеризують рівноважний стан системи.

Отриманий розподіл (12) дозволив розрахувати оптимальні параметри зберігання, за яких природні втрати продукції мають мінімальні значення для заданої температури, відносної вологості та рухомості повітря на вході в штабель. Результати розрахунку відносної вологості та температури сировини по висоті штабеля ( $h = 5$  м) наведені на рис.1 ( $V = 0,034$  м/с) і на рис.2 ( $\varphi_0 = 0,97$ ).

Остання умова забезпечує відсутність конденсації вологи в зоні відпрівання. В результаті задача визначення оптимальних режимів зберігання зводиться до розв'язання системи рівнянь тепло- та масообміну (7) - (9), для яких потрібно зignorувати зону відпотівання (тобто покласти  $\lambda_0 = 0$ ) за відомих умов на виході зі штабеля ( $x = h$ ).

Отримані оптимальні параметри холодильного зберігання плодоовочевої продукції за розробленою моделлю залежно від висоти штабеля (від 2 до 5,5 м), з кроком 0,7 м для моркви: швидкість від 0,036 до 0,054 м/с (за природної конвекції); відносна вологість від 92,05, до 97,61%, підтверджується експериментальними даними Івахнова В.В.

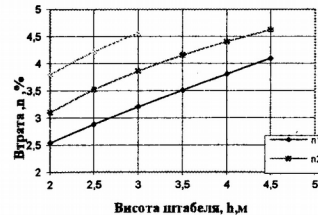


Рис. 5. Графік зміни природних втрат маси яблук ( $n_1$ ) та моркви ( $n_2$ ) за розрахунком, експериментальні дані для моркви ( $n_{2eks}$ ) від висоти штабеля.



Рис. 6. Графік залежності оптимальних значень відносної вологості повітря на вході до штабеля яблук ( $F_1$ ) та моркви ( $F_2$ )

Термодинамічні властивості вологого повітря нами визначались за допомогою розрахунків апроксимацією основних термодинамічних функцій для насипу яблук та введенням у пам'ять ЕОМ таблиць термодинамічних властивостей з інтерполяцією проміжних значень.

В даній главі визначений вплив витрати повітря на умови зберігання продуктів в камерах з організованим повітророзподілом, коли рух повітря можна вважати однонаправленим, на підставі методу елементарних балансів, розробленим Красномовцем П.Г. За цим методом приймають розподілення повітря у камері рівномірним, а його рух однонаправленим. Вантажний відсік камери умовно розбивають на окремі зони в напрямку руху повітря. Розподіл продукту і теплового навантаження у кожній зоні вважають рівномірним. Припускають, що процес випаровування вологи з поверхні продукту ізентальпійний, а перехід із однієї зони в іншу відбувається за сталого вологовмісту. Стан повітря, який залишає  $i$ -ту зону, визначають за формулами:

$$t_i^{вх} = t_{при} + (t_m^{вх} - t_{при}) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot F_{пi}}{G_{пi} C_{p,п}}\right) \quad (13)$$

$$p_i^{вх} = p_{при} - (p_{при} - p_i^{вх}) \cdot \exp\left(\frac{\beta \cdot P_B \cdot F_{пi}}{0,622 \cdot G_{пi}}\right) \quad (14)$$

Послідовне виконання розрахунків за залежностями (13) і (14) для кожної із зон дозволяє визначити зміну стану повітря в штабелі і його параметри на виході із штабеля. За цим методом, розробленим з урахуванням визначених особливостей вологообміну під час зберігання плодоовочевої продукції визначені оптимальні значення витрати повітря, за яких усушка мінімальна

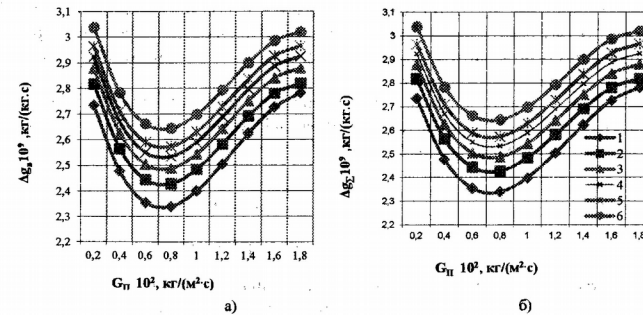


Рис 7. Залежність різниці питомих втрат яблук, викликаних випаровуванням вологи (рис 7а) та різниці сумарних втрат від витрати повітря для різної висоти штабеля. (7б) (криві 1, 2, 3, 4, 5, 6 відповідно для висоти штабеля 1-2 м; 2-2,7 м; 3- 3,4 м; 4-4,1 м; 5-4,8 м; 6-5,5 м)

На підставі розрахунків отримані апроксимаційні залежності різниці питомої та сумарної втрати  $\Delta g_{\Sigma} = f(G_n)$ ,  $\Delta g_{\Sigma} = f(G_n)$ , які використовуються в моделі. Отримані апроксимаційні залежності та оптимальні режими зберігання застосовуються за комплексної оптимізації системи охолодження плодоовочесховищ.

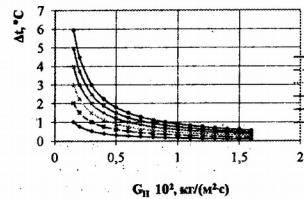


Рис. 8. Залежність зміни температури повітря  $\Delta t$ , °C в штабелі від витрати повітря для різної висоти штабеля (криві 1, 2, 3, 4, 5, 6 відповідно для висоти штабеля 1-2 м; 2-2, 7 м; 3-3, 4 м; 4-4, 1 м; 5-4, 8 м; 6-5, 5 м)

Залежність зміни температури повітря в штабелі від витрати повітря для різної висоти штабеля представлена на рис. 8. Аналітичний вираз залежності  $\Delta t = f(G_n)$ , отриманий на підставі розрахунків, має експоненціальний характер

$$\Delta t = 2,2766 \exp(146,35 G_n) \quad (15)$$

За розробленою моделлю процесів зберігання плодоовочевої продукції: отримані оптимальні параметри холодильного зберігання яблук. Визначений вплив витрати повітря на величину усушки продукту за різних умов його зберігання

У четвертому розділі розроблена модель теплового розрахунку, яка включає: визначення доцільно-економічної товщини ізоляції, тепловий розрахунок огорожень та тепловий розрахунок камери зберігання і теплостійкість огорожувальних конструкцій модуля плодоовочесховища. Головна задача теплового розрахунку системи охолодження: встановити зв'язок між температурою зовнішнього повітря і температурою холодоагенту на вході в повітроохолоджувач.

Розглянутий вплив товщини ізоляційного шару огорожувальної конструкції на значення оптимальних параметрів та цільової функції. Оптимізація режимів роботи холодильної установки проведена за зміни цільової функції, в якій введені відрахування від вартості ізоляції.

Економічно доцільний опір теплопередачі огорожувальної конструкції визначали, виходячи з умови забезпечення найменших приведених витрат  $\Pi_{13}$ , грн/м<sup>3</sup>, які розраховували за формулою:

$$\Pi_{13}(\delta_{13}) = C_0 + C_{13}\delta_{13} + \frac{(t_3 - t_B) \cdot Z_H \cdot m \cdot C_T \cdot I_T \cdot \lambda_{13}}{(R_S \cdot \lambda_B + \delta_{13}) \cdot E_{н.п}}, \quad (16)$$

де  $R_S = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{1}{\alpha_3} + \sum R_{к.с}$  - термічний опір конструкції огороження;

$\pi_{13}$  - коефіцієнт, що враховує відношення термічного опору ізоляції багатошарової захисної конструкції (або однорідної конструкції) до опору теплопередачі,  $t_B$  - температура внутрішнього повітря, °C;  $t_3$  - найвища середня температура зовнішнього повітря за літній період (липень), °C;  $Z_H$  - тривалість найвищої температури за розглядуваний літній період зберігання (охолодження)

плодоовочевої продукції;  $m$  - коефіцієнт, який враховує додаткові втрати тепла на інфільтрацію зовнішнього повітря і який приймається рівним 1,05;  $C_T$  - вартість виробництва холоду на перспективу, грн/Дж;  $I_T$  - коефіцієнт, який враховує зміну вартості виробництва холоду на перспективу;  $\lambda_{13}$  - розрахунковий коефіцієнт теплопровідності матеріалу термоізоляційного шару багатошарової захисної конструкції, Вт/(м·К);  $C_{13}$  - вартість матеріалу термоізоляційного шару багатошарової захисної конструкції, грн/м<sup>3</sup>;  $E_{н.п}$  - норматив для приведення різночасових витрат, 1/грн.

Економічно-доцільну товщину ізоляції визначено з умови мінімальності приведених витрат  $\frac{\partial \Pi_{13}}{\partial \delta_{13}} = 0$

$$\delta_{13}^{ек} = \sqrt{\frac{(t_3 - t_B) \cdot Z_H \cdot m \cdot C_T \cdot I_T \cdot \lambda_{13}}{C_{13} \cdot E_{н.п}} - R_S \cdot \lambda_{13}} \quad (17)$$

Для підтримки оптимальних режимів зберігання рослинної продукції необхідно, щоб всі теплоприпливи відводились холодильним камерним обладнанням. А товщина теплоізоляційного шару огорожень повинна оцінюватися економічною доцільністю використання шару термоізоляції з відповідним термічним опором. Іноді доцільно застосувати теплозахисну сорочку для зменшення теплоприпливів в камері. Розглянутий вплив вибору теплозахисної сорочки на значення економічно-доцільної товщини теплоізоляції.

Встановлено за інженерним методом, що огорожувальні конструкції холодильного модуля мають добрі теплозахисні властивості, вони теплостійкі у відношенні до високочастотних температурних коливань.

Показано, що під час проектування холодильників-плодоовочесховищ, беручи до уваги, що теплоізоляція огорожувальних конструкцій за вартістю складає 40% капіталовкладень на виготовлення холодильника, необхідно проводити розрахунок економічно-доцільної товщини термоізоляції, яка забезпечує мінімум приведених витрат.

Реалізацію цього методу розглянуто на прикладі типового плодоовочесховища, об'ємом камери 100т.

У п'ятому розділі приведені науково-обґрунтовані положення для проектування системи охолодження плодоовочесховища на підставі теоретичних та дослідницьких значень, які підтверджують адекватність математичної моделі реальному фізичному об'єкту.

За створеним алгоритмом оптимізації повітроохолоджувачів був проведений чисельний експеримент з використанням авторського методу за розробленою програмою в середовищі Delphi на мові Object Pascal. Було розраховано більше 3600 варіантів. Крім того, значна кількість варіантів була виключена з гідравлічного розрахунку, тому що «робоча точка» не знаходилась у робочому діапазоні вентиляторів. З розрахунків видно, що ефективніший повітроохолоджувач скомпонований з осьовим вентилятором В-06-300-6,3А.

Проведені дослідження дозволяють визначити за заданим критерієм конкретні кращі варіанти компоновки, діаметр труб і геометричні параметри об'єкту та за користування принципом модульної архітектури у найкоротші терміни

виготовити повітроохолоджувач, оптимізований за обраним критерієм, та підібрати до нього вентилятор.

На підставі розробленої термoeкономічної моделі одноступеневої холодильної установки плодоовочесховищ, в якій температурний напір середовища, яке охолоджується або нагрівається в одному теплообмінному апараті, є залежною змінною, була проведена оптимізація режиму роботи одноступеневої холодильної установки плодоовочесховища.

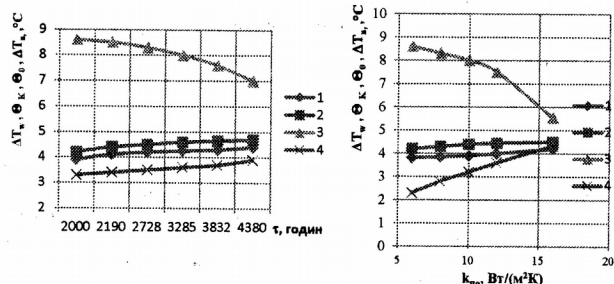


Рис. 9. Залежність оптимальних температурних напорів від кількості робочих годин

1 –  $\Delta T_w$ ; 2 –  $\Theta_k$ ; 3 –  $\Theta_0$ ; 4 –  $\Delta T_b$

Значення оптимальних напорів в повітроохолоджувачі ( $\Theta_0$ ) та конденсаторі ( $\Theta_k$ ) та зміна температур охолоджуваного ( $\Delta T_b$ ) та охолоджувального ( $\Delta T_w$ ) середовищ за фіксованої температури навколишнього середовища ( $t_s=26,4^\circ\text{C}$ ) під час безперервної роботи установки протягом року  $t_p=4380$  годин наведені на рис. 9, які відповідають рекомендованим значенням нормативних документів з експлуатації холодильних установок. Оцінка впливу коефіцієнту теплопередачі повітроохолоджувача на значення оптимальних ( $\Theta_0$ ,  $\Theta_k$ ,  $\Delta T_w$ ,  $\Delta T_b$ ) наведена на рис. 10. Коефіцієнт теплопередачі повітроохолоджувача практично не вплинув на оптимальні значення перпадів температур ( $\Theta_0$ ,  $\Delta T_w$ ) в конденсаторі.

Співвідношення економічних, енергетичних, вартісних показників та власних значень приведених витрат для окремих вузлів холодильної установки приведені на рис. 4.12, 4.13, 4.14, 4.15.

Як видно з гістограм, крім компресора на всі розглянуті показники вагомий вплив мають повітроохолоджувачі. В цьому випадку оцінка впливу різних факторів на значення цільової функції і окремих показників камерних приладів охолодження є суттєвою.

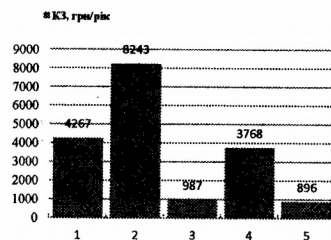


Рис. 11. Гістограма відрахувань (нормативних, на реновацію та ремонт) від вартості обладнання холодильної установки 1 –  $e_{11}$ ; 2 –  $e_{32}$ ; 3 –  $e_{12}$ ,  $e_{13}$ ; 4 –  $e_{41}$ ,  $e_{42}$ ; 5 –  $e_{21}$ ,  $e_{22}$

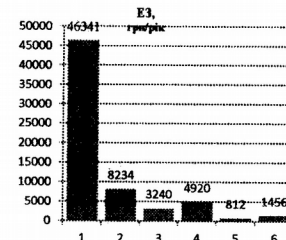


Рис. 12. Гістограма експлуатаційних затрат вартості зворотної води, споживаної електроенергії на роботу відповідного обладнання: 1 –  $e_{11}$ ; 2 –  $e_{32}$ ; 3 –  $e_{13}$ , 4 –  $e_{42}$ , 5 –  $e_{22}$ , 6 –  $V_{сва}$

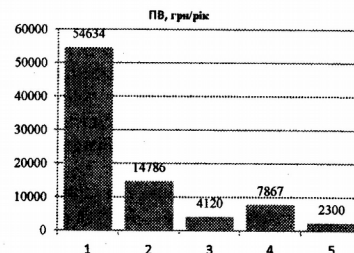


Рис. 13. Гістограма власних значень приведених витрат для окремих вузлів та елементів холодильної установки: 1 –  $e_{11}$ ; 2 –  $e_{32}$ ; 3 –  $e_{12}$ ,  $e_{13}$ ; 4 –  $e_{41}$ ,  $e_{42}$ ; 5 –  $e_{21}$ ,  $e_{22}$

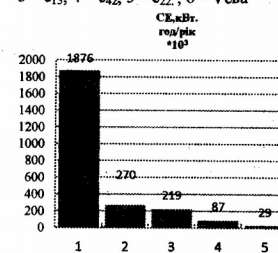


Рис. 14. Гістограма споживаної електроенергії для окремих вузлів та елементів холодильної установки: 1 –  $e_{11}$ ; 2 –  $e_{32}$ ; 3 –  $e_{41}$ ,  $e_{13}$ ; 4 –  $e_{32}$ ; 5 –  $e_{22}$

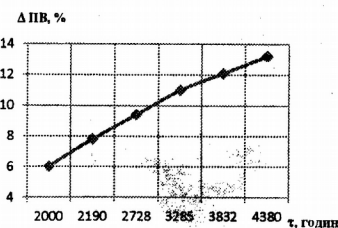


Рис. 15. Залежність відносної економії приведених витрат від тривалості роботи холодильної установки

Оптимізація режиму роботи обладнання холодильної установки дозволяє скоротити змінну частину витрат наближено на 10-13,2 %, що за тривалої експлуатації обладнання дає значну економію.

Експериментальна камера розташовувалась на території науково-експериментального відділу НДКПХТТ «Агрохолод» і уявляла собою приміщення розміром в плані:  $18 \times 6$  м, висотою 6 м. (рис. 16, рис. 17).

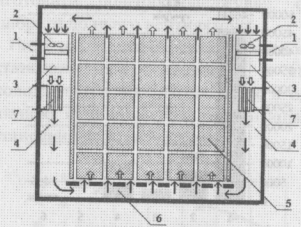


Рис. 16. Схема камери. 1 – трубопроводи холодоагента; 2 – вентилятор; 3 – повітроохолодник; 4 – теплозахисна повітряна оболонка; 5 – штабель продукції; 6 – система повітропроводів у підлозі камери; 7 – пливкові зволожувачі

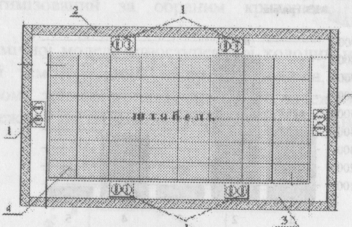


Рис. 17. Схема камери зберігання плодовоовочевої продукції в плані. 1 – повітроохолодник; 2 – огородження; 3 – теплозахисна повітряна оболонка; 4 – штабель продукції; 5 – штабель продукції

Для системи охолодження камери застосовані повітроохолоджувачі площею поверхні  $75 \text{ м}^2$  з осьовими вентиляторами В-06-300-6,3А. Проведені дослідження показали хорошу збіжність результатів розрахунків, отриманих за пропонованою моделлю, із значеннями, які отримані експериментально, що підтверджує адекватність математичної моделі реальному фізичному об'єкту. Різниця між експериментальними і розрахунковими даними становила 0,32%.

За результатами розрахунків розроблені технічні рішення зі створення експериментальної камери та укомплектована система охолодження плодовоовочесховища 100 т м. Одеси з повітроохолоджувачем і випарним конденсатором, які виготовлені НДКПХТТ «Агрохолод» (рис. 18, рис. 19).

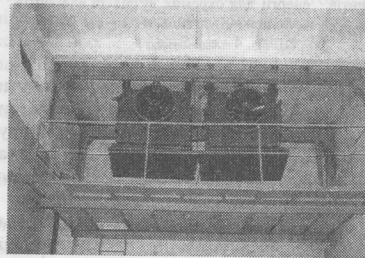


Рис. 18. Повітроохолоджувачі, які розроблені та виготовлені НДКПХТТ «Агрохолод»

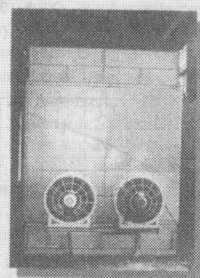


Рис. 19. Випарний конденсатор, який розроблений та виготовлений НДКПХТТ «Агрохолод»

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

xv 1070  
 ІНСТИТУТ ХОЛОДА  
 ОНАХТ  
 бібліотека

Вище в розділах даної роботи наведена аргументація актуальності, описані методи та результати розв'язання задач підвищення ефективності системи охолодження плодовоовочесховищ.

Одержані наукові результати свідчать, що поставлені в роботі задачі з підвищення ефективності системи охолодження плодовоовочесховищ виконані. Наукова новизна та практична значимість отриманих результатів сформульована у висновках відповідних розділів роботи. Узагальнення одержаних наукових та практичних результатів дозволяє зробити такі висновки:

1. Розроблена термоекономічна модель одноступеневої холодильної установки плодовоовочесховищ з урахуванням особливостей конструктивних елементів повітроохолоджувачів для плодовоовочесховищ, вибраних з урахуванням виведених технологічних та економічних критеріїв оптимальності, в якій температурний напір та зміна температур охолоджуваного або нагріваного середовищ в одному теплообмінному апараті є залежною змінною.
2. На підставі розробленої термоекономічної моделі була проведена оптимізація режиму роботи холодильної установки та визначений температурний напір в повітроохолоджувачі ( $\Theta_0 = 6,8 \div 8,4^\circ\text{C}$ ) та конденсаторі ( $\Theta_k = 4,2 \div 4,7^\circ\text{C}$ ) і зміни температур охолоджуваного ( $\Delta T_b = 3,2 \div 3,8^\circ\text{C}$ ) та охолоджувального середовищ ( $\Delta T_w = 3,8 \div 4,5^\circ\text{C}$ ) за фіксованої зовнішньої температури та безперервної роботи установки протягом року  $\tau_p = 4380$  годин, що відповідає рекомендованим значенням нормативних документів з експлуатації холодильних установок.
3. Визначено, що 31,6 $\pm$ 40% ексергії, яка підводиться до електродвигуна компресору та насосу холодоагента, використовується для виробництва холоду. При цьому, з точки зору термодинамічних досконалостей, перевагу віддається розробленому повітроохолоджувачу. За укомплектування холодильної установки даними повітроохолоджувачами продуктивність зростає на 9,7% порівняно з установкою, укомплектованою ВОП-75.
4. Проведена оптимізація конструктивних елементів повітроохолоджувача (висоти ребер, кроку ребра, відстані між трубами тощо) на основі комплексних критеріїв оптимізації за авторським методом. Розраховано економічний ефект. За результатами оптимізаційних розрахунків для системи охолодження камери застосовані повітроохолоджувачі площею поверхні  $75 \text{ м}^2$  з осьовими вентиляторами В-06-300-6,3А, які розроблені та виготовлені НДКПХТТ «Агрохолод» за результатами оптимізаційних розрахунків. Отримана ексергетична продуктивність вибраної компоновки більша на 6,7%, ніж компоновки повітроохолоджувача з двома вентиляторами В-06-300-5А. Повітряні потоки, які надходять із верхніх отворів повітроохолоджувачів, підпорядковуються закономірностям стиснутого струменя в обмеженому просторі.
5. Встановлено оптимальні параметри холодильного зберігання плодовоовочевої продукції за розробленою моделлю залежно від висоти штабеля (від 2 до 5,5

- м) з кроком, кратним висоті ящика (0,7 м). Для температури зберігання 0°C оптимальні режими становлять: швидкість повітря від 0,026 до 0,047 м/с; відносна вологість від 97,43 до 91,95%.
- Визначений вплив витрати повітря на величину усушки продукту на основі розробленої комп'ютерної моделі. На підставі аналізу залежності сумарних втрат фруктів від витрати повітря для різних значень відносної вологості повітря знайдені оптимальні величини витрати повітря, за яких втрати продукції від втрати від усушки мінімальні. Так, наприклад, під час зберігання яблук у штабелі висотою 2 м екстремальна величина масової витрати повітря 0,008 кг/(м<sup>2</sup>·с), за якої мінімальні сумарні втрати продукту за цикл зберігання становлять 16,2 кг/т.
  - Визначено економічно-доцільну товщину шару теплоізоляції з урахуванням способу повітророзподілу за активного вентилявання штабеля плодоовочевої продукції в умовах динамічно змінюваної температури зовнішнього повітря, яка призвела до зменшення витрати електроенергії на експлуатацію холодильної установки на 10,4% (економічно-доцільна товщина шару теплоізоляції становить:  $\delta_{pi}=0,134$  м (пінополіуретан) і  $\delta_{is}=0,175$  м (ПСБ-С)).
  - Проведена комплексна оптимізація системи охолодження плодоовочесховищ, яка базується на визначенні мінімуму приведених витрат на зберігання плодоовочевої продукції за розробленою моделлю. Знайдені раціональні характеристики теплообмінних апаратів, що сприяють процесу проектування енергоощаджувальної системи охолодження.
  - Проведені теоретичні та промислові дослідження показали збіжність результатів розрахунків, які отримані за розробленою моделлю, з експериментальними значеннями і підтверджують адекватність математичної моделі реальному фізичному об'єкту. Різниця між експериментальними і розрахунковими даними складає 0,32%.
  - На підставі досліджень укомплектована система охолодження плодоовочесховища 100 т м. Одеси повітроохолоджувачем і випарним конденсатором, які виготовлені НДКТИХТТ «Агрохолод» на підставі рекомендованих оптимізаційних розрахунків

#### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

- Красномовець П.Г. Оптимізація воздухоохладителей камеры холодильного хранения плодоовощного сырья по критерию минимума эксплуатационных затрат. [Текст] / П.Г.Красномовець, Н.В. Герасименко (Жихарева), В.И. Перепека // Збірник наукових праць 5-ї науково-методичної конференції «Людина та навколишнє середовище. Проблеми безперервної екологічної освіти в ВУЗАХ». – Одеса: Вид-во ОДАХ, 1996. – С. 77.  
*Особистий внесок: постановка задачі, розробка методу оптимізації повітроохолоджувача.*
- Красномовець П.Г. Оптимізація повітроохолоджувачів для фруктоовочесховищ / П.Г. Красномовець, Н.В. Герасименко (Жихарева), В.І. Перепека // Придніпровський науковий вісник. – 1998, № 108 (175) – С.42-48.

- Особистий внесок: постановка задачі, аналітичне дослідження, розробка моделі виконання розрахунків, отримання оптимізаційних розрахунків.*
- Жихарева Н.В. Моделирование процессов кондиционирования воздуха. [Текст] / Н.В.Жихарева // Холодильная техника і технологія. – 2000, № 65. – С. 54–59.  
*Особистий внесок: аналітичне виведення апроксимаційних залежностей для розрахунку процесів кондиціювання повітря.*
  - Жихарева Н.В. Метод розрахунку процесів тепломасообміну в камерах зберігання плодоовочесховищ з повітряним охолодженням. [Текст] / Н.В.Жихарева // Холодильная техника і технологія. – 2000, № 68. – С.32–35.  
*Особистий внесок: розробка методу розрахунку, створення алгоритму.*
  - Жихарева Н.В. Оптимізація енерго- та ресурсозберігаючої системи охолодження плодоовочесховищ [Текст] / Н.В. Жихарева, П.Г. Красномовець // Збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції– 2001. (Додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія»). – С. 25–28.  
*Особистий внесок: розробка моделі комплексної оптимізації системи охолодження плодоовочесховищ.*
  - Жихарева Н.В. Чинники, що впливають на оптимізацію системи охолодження плодоовочесховищ [Текст] / Н.В. Жихарева // Сборник научных трудов 2-ой Международной научно-технической. – Одесса: Из-во ОДАХ – 2002. – С. 119-120.  
*Особистий внесок: висунення ідеї методології оптимізації системи охолодження.*
  - Жихарева Н.В. Чинники, що впливають на оптимізацію системи охолодження плодоовочесховищ [Текст] / Н.В. Жихарева // Збірник наукових праць 2-ї Міжнародної науково-технічної конференції (Додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія»). – 2002. – С. 137–142.  
*Особистий внесок: обґрунтування чинників, визначення оптимальних параметрів зберігання, визначення доцільно-економічної товщини теплоізоляції.*
  - Красномовець П.Г. Результаты оптимізації системи охолодження плодоовочесховищ. [Текст] / П.Г. Красномовець, Н.В. Жихарева Н.В. // Холодильная техника і технологія. – 2002, № 3 (77). – С. 57–61.  
*Особистий внесок: обґрунтування оптимізації, результати розрахунків.*
  - Жихарева Н.В. Метод расчета годового потребления холода СКВ [Текст] / Н.В.Жихарева, А.И. Липа, А.С.Лазанюк // Збірник наукових праць 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: Вид-во ОДАХ – 2003. – С. 22.  
*Особистий внесок: ідея розробки методу, розробка програмного модуля.*
  - Энергосберегающие биотехнологические процессы охлаждения и хранения плодоовощных продуктов. [Текст] / Н.Н.Дидык, А.И.Липа Н.В. Жихарева и др. //Збірник наукових праць 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: Вид-во ОДАХ – 2003. – С. 21.  
*Особистий внесок: анализ современных систем охолодження плодоовочесховищ.*
  - Пат. 54564 Україна, 7 F28B1/02 Спосіб роботи випарного конденсатора і випарний конденсатор для його здійснення. [Текст] / Е.А. Бакум., П.Г.

- Красномовець, С.І. Кулаков, Н.В. Жихарєва, М.І. Гоголь; заявитель та патентоволодар Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут холодильної техніки і технології «Агрохолод» – № 200063411 заяв. 12.06.00; Опубл. 17.03.03 Бюл. № 3 – 2 с.
- Особистий внесок: розрахунок параметрів за моделлю.*
12. Жихарєва Н.В. Методи розрахунку теплового навантаження об'єктів кондиціонування повітря. [Текст] / Н.В. Жихарєва // Збірник наукових праць 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: Вид-во ОДАХ – 2005. – С. 37–38.
- Особистий внесок: розробка моделі розрахунку з врахуванням запізнення впливу прямої та розсіяної радіації.*
13. Оборудование холодильной камеры для хранения плодов. [Текст] / Дидык Н.Н., Лазанюк А.С., Шепель С.В., Жихарєва Н.В. // Продукты и ингредиенты –2005. – № 3 (12). – С. 48–50.
- Особистий внесок: аналітичне дослідження, розрахунок параметрів зберігання у РГС.*
14. Жихарєва Н.В. Оптимізація енергозберігаючої системи кондиціонування повітря. [Текст] / Н.В. Жихарєва // Збірник наукових праць 5-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: Вид-во ОДАХ – 2007. – С. 56.
- Особистий внесок: висунення ідеї оптимізації складної системи.*
15. Жихарєва Н.В. Математична модель процесів зберігання плодоовочевої продукції. [Текст] / Н.В. Жихарєва // Збірник наукових праць 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: Вид-во ОДАХ – 2009. – С. 167–170.
- Особистий внесок: розробка математичної моделі процесів зберігання плодоовочевої продукції.*
16. Жихарєва Н.В. Розрахунок інфільтрації зовнішнього повітря в виробничих приміщеннях [Текст] / Н.В. Жихарєва // Збірник тез доповідей 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції. Частина 1. – Одеса: Вид-во ОДАХ – 2011. – С. 146–147.
- Особистий внесок: ідея розрахунку впливу теплоприпливів від інфільтрації.*
17. Жихарєва Н.В. Оптимальні режими зберігання плодоовочевої продукції при активному вентиляванні. [Текст] / Н.В. Жихарєва // Збірник тез доповідей 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції. Частина 1. – Одеса: Вид-во ОДАХ – 2011. – С. 148–149.
- Особистий внесок: результати розрахунку параметрів зберігання з врахуванням витрати повітря через штабел.*
18. Жихарєва Н.В. Термодинамічний аналіз ефективності судових холодильних установок. [Текст] / Н.В. Жихарєва, М.Г. Хмельнюк // Матеріали 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв Вид-во НУК – 2012. – С. 348–353.
- Особистий внесок: розробка термoeкономічної моделі холодильної установки для судових холодильних установок.*
19. Жихарєва Н.В. Термодинамічний аналіз ефективності судових холодильних установок. [Електронний ресурс] / Н.В. Жихарєва, М.Г. Хмельнюк // Вісник

Національного університету кораблебудування: Миколаїв. НУК, 2012. Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua/rv/>.

*Особистий внесок: результати розрахунку за термoeкономічною моделлю судової холодильної установки.*

20. Жихарєва Н.В. Термoeкономічна модель холодильної установки плодоовочесховищ. [Текст] / Н.В. Жихарєва // Збірник наукових праць 8-ї Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 90-річчю Одеської державної академії холоду (Додаток до науково-технічного журналу Холодильна техніка і технологія (вип. 4 (138), 2012)). – Одеса: Вид-во Гринь Д.С. – С. 244–248.
- Особистий внесок: розробка термoeкономічної моделі холодильної установки плодоовочесховищ, визначення приведеної вартості.*
21. Жихарєва Н.В. Оптимізація режиму роботи холодильної установки плодоовочесховищ [Текст] / Н.В. Жихарєва, М.Г. Хмельнюк // Холодильна техніка і технологія. – 2012. № 5 (139) – С. 16–20.
- Особистий внесок: складання функціонального визначення мінімуму приведених витрат. Проведення розрахунків за розробленим методом.*

#### АНОТАЦІЯ

**Жихарєва Н.В.** «Підвищення ефективності системи охолодження плодоовочесховищ» – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування». Одеса, 2013 р.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності системи охолодження плодоовочесховищ. Для цього розглядається оптимізація системи охолодження, необхідної для проектування холодильних камер для зберігання плодоовочевої продукції, з вирішенням задач енергозбереження.

Оптимізація системи охолодження плодоовочесховищ проводиться для отримання оптимальних параметрів зберігання плодоовочевої продукції з урахуванням впливу витрати повітря на усущку плодоовочевої продукції. Для цього оптимальні режими роботи системи охолодження одержані на основі законів динамічної оптимізації процесів тепло- і масообміну в огорожувальній конструкції, у штабелі продукції та в повітроохолоджувачі з визначенням ексєргетичних показників, які забезпечують мінімум приведених витрат.

Розроблена термoeкономічна модель, вперше враховує особливості конструктивних елементів повітроохолоджувачів для плодоовочесховищ, які вибрані з урахуванням виведених технологічних та економічних критеріїв оптимальності. У якості незалежних змінних для цього обрані лише  $\Delta T_w$  – перепад температур у конденсаторі;  $\Delta T_s$  – перепад температур повітря в повітроохолоджувачі, а  $\Theta_k$ ,  $\Theta_0$  – температурні напори в конденсаторі та повітроохолоджувачі є залежними змінними від  $\Delta T_w$  та  $\Delta T_s$ .

За результатами рішення визначений оптимальний режим роботи холодильної установки, який забезпечує мінімум приведених витрат. Оптимізація режиму роботи обладнання холодильної установки дозволяє скоротити змінну частину

витрат приблизно на 10-13,2%, що при тривалій експлуатації обладнання дає значну економію.

Отримані рекомендації для вибору оптимальних режимів експлуатації з урахуванням технологічних, конструктивних і вартісних показників, які були використані на холодильній установці плодоовочесховища об'ємом камери складає 100 т плодоовочевої продукції НДКТИХТТ «Агрохолод». Перевірена адекватність моделі. На підставі цих досліджень укомплектована система охолодження плодоовочесховища 100 т. Одеси з обладнанням, яке виготовлене НДКТИХТТ «Агрохолод» на підставі рекомендаційних розрахунків.

**Ключові слова:** *термоекономічна модель, ексергія, термоекономічний аналіз, система охолодження, процеси тепло- та масообміну, оптимальні параметри зберігання; витрата повітря, усушка, огороджувальні конструкції, повітроохолоджувач, моделювання, оптимізація.*

#### АННОТАЦИЯ

**Жихарева Н.В.** «Повышение эффективности системы охлаждения плодоовощехранилища» – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. Одесса – 2013 г.

Диссертация посвящена повышению эффективности системы охлаждения плодоовощехранилищ. Данные задачи решаются оптимизацией системы охлаждения, необходимой для проектирования холодильных камер хранения плодоовощной продукции, с решением задач энергосбережения.

Оптимизация охлаждающей системы плодоовощесховищ проводится для оптимальных параметров хранения плодоовощной продукции с учетом влияния расхода воздуха на усушку плодоовощной продукции, а оптимальные режимы работы охлаждающей системы определены на основе законов динамической оптимизации процессов тепло- и массообмена в ограждающих конструкциях, в штабели продукции и в воздухоохладителе с определением эксергетических показателей и эксергетических потерь, как составных критерия термодинамической эффективности энергетических систем, которые обеспечивают минимум приведенных затрат.

Разработанная термоэкономическая модель, впервые учитывает особенности конструктивных элементов воздухоохладителей для плодоовощехранилищ, выбранных на основе выведенных технологических и экономических критериев оптимальности. В качестве независимых переменных для этого выбраны только  $\Delta T_w$  – перепад температур в конденсаторе;  $\Delta T_a$  – перепад температур воздуха в воздухоохладителе, а  $\Theta_k$ ,  $\Theta_0$  – температурные напоры в конденсаторе и охладителе являются зависимыми переменными от  $\Delta T_w$  и  $\Delta T_a$  соответственно.

По результатам решения определен оптимальный режим работы холодильной установки, который обеспечивает минимум приведенных затрат. Оптимизация режима работы оборудования холодильной установки позволяет сократить

переменную часть расходов примерно на 10-13,2%, что при длительной эксплуатации оборудования дает значительную экономию.

Полученные рекомендации по выбору оптимальных режимов эксплуатации были использованы на холодильной установке плодоовощехранилища емкостью 100 т, плодоовощной продукции НИИТИХТТ «Агрохолод», на которой экспериментально проверена адекватность разработанной модели. На основании этих исследований укомплектована охлаждающая система плодоовощехранилища с изготовленными воздухоохладителем и испарительным конденсатором.

**Ключевые слова:** *термоэкономическая модель, эксергия, термоэкономический анализ, оптимизация, плодоовощная продукция, система охлаждения, процессы тепло- и массообмена, оптимальные параметры хранения; расход воздуха, усушка, воздухоохладитель, моделирование.*

#### ABSTRACT

**Zhikhareva N.V.** «Effectiveness increase for fruit and vegetables store cooling system» – Manuscript.

Thesis for candidate degree of technical science according major 05.05.14 – «Refrigeration, vacuum and compressor engineering, air-conditioning system». Odessa 2013.

The thesis is devoted to the increase in efficiency of the cooling system storage of fruit and vegetables. This optimization problem is solved of the cooling system storage of fruit and vegetables, necessary for designing cold rooms for storage of fruits and vegetables, with the tasks of conservation.

The thesis is about effectiveness increase for fruit and vegetables store cooling system. Cooling system optimization for cooling chamber engineering which is made for fruit and vegetables store together with energy savings problem solution are done. Optimizing cooling system we are derived optimal parameters for fruit and vegetables store. It is considered air consumption impact on fruit and vegetables shrinkage. Optimal operation modes for cooling system are defined in terms of low of dynamic heat and mass exchange processes optimization for barriered construction, for product piles and for air cooler. The thermoeconomical model is developed with taking into account the air cooler structural elements features for fruit and vegetables stores which is picked up in consideration of proposed technological and economical optimality criterions. The independent variables selected for this only  $\Delta T_w$  – temperature difference in the condenser, the temperature difference  $\Delta T_a$ .

Operation mode optimization for cooler unit lets to reduce cost variables about 10-13,2%, that leads to getting essential economy. The recommendations for optimal operation mode choice in terms of technological, structural and cost characteristics are offered. It is implemented for fruit and vegetables store with 100 ton store volume in the Scientific Research Design Technological Institute of Refrigeration Engineering «Agroholod», Odessa.

**Key Words:** *thermoeconomical model, exergy, thermoeconomical analysis, cooling system, heat and mass exchange processes, product shrinkage, consumption of air.*