

Авторефер
А56

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

АЛЬ-АХРАС Гассан Халед Мохаммед

УДК 621.560:621.565.58

**ТЕПЛОФІЗИЧНІ АСПЕКТИ ХОЛОДИЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ
ПЛОДООВОЧЕВОЇ ПРОДУКЦІЇ В УМОВАХ ЖАРКОГО КЛІМАТУ**

Спеціальність 05.04.03 - Холодильна та криогенна техніка,
системи кондиціювання

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

XV 860
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Одеса - 1999

Автореферат є рукопис.

Робота виконана на кафедрі механіки і кондиціонування повітря Одеської державної академії холоду Міністерства Освіти України та в Науково-дослідному та конструкторсько-технологічному інституті холодильної техніки і технології «Агрохолод»

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кирилов Володимир Харитонович,
Одеська державна академія холоду,
завідувач кафедри механіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Притула Валерій Васильович,
Одеська державна академія холоду,
завідувач кафедри тепломасообміну, проректор

кандидат технічних наук, ст. науковий співробітник
Дідик Наталя Миколаївна,
Інженерно-технологічний інститут «Біотехніка» УААН

Провідна організація: Одеська державна академія харчових технологій
ім. М. В. Ломоносова. Міністерство Освіти України,
м. Одеса.

Захист відбудеться " 29 " вересня 1999 року о 11 год. 00 хв. на засіданні
Спеціалізованої Ради Д41.087.01 при Одеській державній академії холоду
за адресою: 270026, м. Одеса, вул. Дворянська, 1/3.

Копію можна ознайомитись у бібліотеці Одеської державної академії

затверджений " 28 " серпня 1999 р.

Нікульшин Р. К.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Накопичений досвід у створенні, проектуванні та розвитку холодильного господарства в галузі зберігання соковитої рослинної сировини в умовах помірного клімату не можна безпосередньо переносити на створення технологій бережливого зберігання в країнах, що розвиваються. Крім економічних обставин, тут необхідно враховувати ще й специфіку кліматичних зон, кожна з яких потребує особливого підходу до проектування плодовоовочесховищ.

В умовах жаркого клімату мають місце великий приплив тепла і значні коливання температури та відносної вологості повітря в камерах зберігання, що необхідно враховувати, проектуючи, будуючи та експлуатуючи плодовоовочесховища, а також під час створення програмних режимів роботи холодильного обладнання для забезпечення мінімуму природних втрат рослинної сировини.

Тому створення ефективних технологій, з точки зору економії енергії, води та капітальних витрат на побудову сховищ, це одна з актуальних задач економічного відродження країн на шляху розвитку, для більшості яких не мале місце в експорті займають овочі та фрукти, збирання врожаю яких ведеться цілий рік.

Аналіз літературних джерел, присвячених холодильному зберігання рослинної сировини, приводить до висновку про те, що існуючі технології холодильного зберігання плодів та овочів здебільшого не забезпечують необхідних умов у штабелі продукції для тривалого зберігання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідної та дослідно-конструкторської програми на 1992 - 1998 роки «Створення економічно ефективного обладнання та холодильних технологій обробки і зберігання рослинної сировини в місцях вирощування врожаю» (постанова колегії Мінсільгоспспроду України № К-4/2 от 12.12.91); договору на створення (передачу) науково-технічної продукції між Головним управлінням координації, освоєння НТП та інформатики Мінсільгоспспроду України та НДКПХТТ «Агрохолод» «Розробити та впровадити економіко-математичні моделі раціонального використання холодильних підприємств для плодовоовочевої продукції» на 1995 - 1998 рр.

Мета і задачі роботи. Мета роботи: на основі теплофізичних досліджень процесів тепломасообміну в штабелі продукції з кондиціонованою вентиляцією повітряним потоком створити бережливу технологію холодильного зберігання соковитої рослинної сировини з урахуванням зовнішніх теплоприпливів з довкілля. Для досягнення цієї мети поставлені та розв'язані такі задачі:

- досліджено процеси тепломасообміну та формування температурно-вологісних полів у штабелі з овочами чи фруктами при активній вентиляції;
- встановлено оптимальні режими холодильного зберігання плодовоовочевої продукції;

- установленный взаимосвязь между параметрами воздуха доквилья, в камере, штабелі та режимом роботи системи охолодження;
- проведений тепловий розрахунок і досліджена теплостійкість огорожуючих конструкцій плодоовочесховищ;
- проведена оптимізація режимів роботи холодильної установки при холодильному зберіганні плодів та овочів в умовах жаркого клімату.

Основні наукові положення, що захищаються в роботі:

1. Визначення оптимальних режимів зберігання рослинної сировини при активному вентиляванні повинне базуватися на математичній моделі тепловологісних процесів в насипу продукції, причому оптимальні значення для швидкості і парціального тиску пари вентиляційного повітря визначаються з умов відсутності зони відпотівання у верхній частині штабеля, а оптимальне управління режимами роботи, холодильною установкою повинне здійснюватись на основі законів динамічної оптимізації регулювання процесів тепло- масообміну, які відбуваються як у огорожуючих конструкціях, так і в штабелі продукції і в холодильній системі.

Наукову новизну дослідження складають:

- методика і результати моделювання процесів тепломасообміну в штабелі рослинної продукції при холодильному зберіганні;
- наукове обґрунтування оптимальних режимів зберігання;
- методика та результати дослідження теплопередачі через огорожуючі конструкції камери зберігання;
- методика і результати дослідження процесів теплопередачі в основних елементах камерної системи охолодження при активній вентиляції штабеля продукції;
- методика динамічної оптимізації холодильної системи.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі теплофізичних досліджень розроблено науково обґрунтовану методику ефективної технології холодильного зберігання плодоовочевої продукції в умовах жаркого клімату.

Достовірність наукових результатів та наукових положень підтверджується узгодженістю одержаних даних з інформацією про експериментальні дослідження, про природні втрати рослинної продукції внаслідок холодильного зберігання та витрати електроенергії, наведені в нормативній та науково-технічній літературі.

Особистий внесок дисертанта. Дисертація виконана самостійно з використанням консультацій наукового керівника. В опублікованих роботах у співавторстві дисертанту належать окремі теоретичні розробки, постановки задач, складання програм та проведення розрахунків на ЕОМ, аналіз результатів досліджень та розробка методології динамічної оптимізації холодильних систем.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались: на 60-й навчально-методичній та науково-технічній конференції «Теорія і практика

вузівської науки» (Одеса, 1995); на щорічних наукових конференціях професорсько-викладацького складу та наукових співробітників ОДАХ в період 1996-1998 р.; на 1-й Міжнародній науково-практичній конференції «Технічний університет» (Одеса, 1996); 1997 International Compressor Technique Conference (China, 1997); 1998 International Refrigeration Conference (Purdue USA, 1998).

Публікації. За темою дисертації опубліковані 4 статті.

Структура та обсяг дисертації: робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літературних джерел та додатку. Основний текст складається з 149 сторінок машинописного тексту, 38 рисунків, 20 таблиць. Бібліографія включає 158 назв.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині роботи розглянуто:

- кліматичні та соціально-економічні умови Йорданії;
- особливості зберігання окремих плодів, що вирощуються в Йорданії;
- короткий огляд літературних джерел щодо холодильного зберігання плодоовочевої продукції.

На основі виконаного аналізу теоретичних і експериментальних робіт зроблено висновки та сформульовано основні задачі дослідження.

Розділ 1 присвячений теоретичному дослідженню процесів тепло- та масообміну при зберіганні плодоовочевої продукції та визначенню оптимальних режимів зберігання. Однорідність і стабільність тепловологісних умов у штабелі рослинної продукції – необхідна умова її тривалого зберігання. Неминуча нерівномірність і нестабільність тепловологісних полів за рахунок зовнішніх теплоприпливів через огороження камери зберігання не можуть бути кількісно оцінені без теоретичного опису тепловологісних полів у масі продукції при активній її вентиляції холодним повітрям. Математичний опис процесів тепло- та масообміну в насипу продукції з урахуванням зони відпотівання зображається наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\lambda_0 \frac{d^2 t_s}{dx^2} + \rho_n q_0 \exp(b_s t_s) = \alpha F_n (t_s - t_r) + \beta_p \varepsilon_r F_n (p'' - p), \quad (1)$$

$$\varepsilon c_p \rho_r V \frac{dt_r}{dx} = \alpha F (t_s - t_r), \quad \frac{0.622 dp}{P_{всп} dx} = \beta_p \frac{\varepsilon_r F_n}{\varepsilon V \rho_r} (p'' - p). \quad (2)$$

Граничні умови на вході та виході зі штабеля мають вигляд:

$$\text{на вході - при } x = 0: \quad t_r = t_0, \quad \lambda_0 \frac{dt_s}{dx} = \alpha \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (t_s - t_0), \quad p = p_0; \quad (3)$$

$$\text{на виході - при } x = h: \quad \lambda_0 \frac{dt_s}{dx} = \alpha_n \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (t - t_s), \quad (4)$$

тут α_h – коефіцієнт, моделюючий тепловіддачу при змішуванні теплового потоку повітря, що виходить зі штабеля з холодним повітрям камери зберігання. Коефіцієнти теплопровідності λ_0 та тепловіддачі α для насипу сировини визначаються відповідно до формул Зенера-Бауера і Гнелинського, що експериментально встановлені для щільно упакованого сферичного шару з рухливим газом.

В умовах зберігання рослинної сировини візьмемо лінійні апроксимації:

$$p'' = m_p + n_p t_s, \quad \exp(b_s t_s) = 1 + b_s t_s. \quad (5)$$

Після нескладних перетворень (1) – (5) для розподілу температури повітря по висоті штабеля одержимо наступне диференційне рівняння (у безрозмірній формі):

$$\gamma t_r^{IV} + d_3 t_r^{III} + d_2 t_r^{II} + d_1 t_r^I + d_0 t_r + c_0 = 0 \quad (6)$$

із сингулярним збуренням ($\gamma \ll 1$).

Побудовано асимптотичний розв'язок даного рівняння. І розподіл тепловологісних полів по висоті насипу зобразимо такими залежностями:

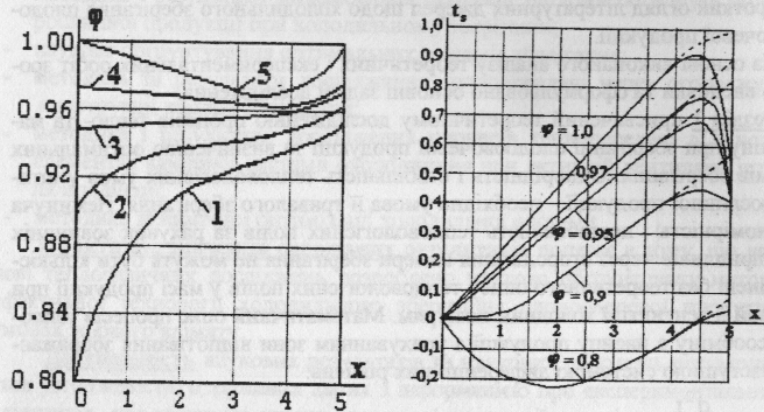


Рис. 1. Зміна відносної вологості повітря по висоті насипу при ϕ_0 :
1 - 0,8; 2 - 0,9; 3 - 0,95; 4 - 0,97; 5 - 1,0.

Рис. 2. Залежність температури продукції t_s по висоті насипу при різних значеннях відносної вологості:
— розрахунок, проведений за (1)–(2);
--- розрахунок, проведений при $\lambda_0 = 0$.

$$t_r(x) = t_* + \sum_{i=1}^4 C_i \exp(\lambda_i x), \quad t_s(x) = t_* + \sum_{i=1}^4 C_i t_i \exp(\lambda_i x), \quad (7)$$

$$p(x) = p_* + \sum_{i=1}^4 C_i p_i \exp(\lambda_i x). \quad (8)$$

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 ($\phi_0 = 0,97$).

Отриманий розподіл (7) – (8) дозволяє розрахувати оптимальні режими зберігання, при яких природні втрати продукції мають мінімальні значення для заданої температури, відносної вологості та рухливості повітря на вході в штабель. Кількість вологи, що випаровується, згідно з рівнянням (2) визначається за формулою:

$$G = \int_0^h \varepsilon_f \cdot F_H \cdot \beta_p \cdot (p'' - p) \cdot S \cdot \tau \cdot dx, \quad (9)$$

а відносна усушка дається відношенням G до первинної кількості продукції

$$n = \frac{100 \cdot G}{\rho_H \cdot h \cdot S} = \frac{100 \cdot \varepsilon_f \cdot \beta_p \cdot F_H \cdot \tau}{\rho_H \cdot h} \cdot \int_0^h (p'' - p) dx, \% \quad (10)$$

Вважається, що оптимальні режими холодильного зберігання забезпечуються наступними значеннями параметрів, що характеризують тепловологісний стан кондиційованого повітря:

- температура повітря на вході в штабель $t_0 = t^*$;
- перепад температури по висоті штабеля $\Delta t_r = t(h) - t_0 = 0,5$ °С; (11)
- відносна вологість повітря на виході зі штабеля $\phi(h) = 96\%$.

Остання умова забезпечує відсутність конденсації вологи в зоні відпотівання. В результаті задача визначення оптимальних режимів зберігання зводиться до розв'язання системи рівнянь ТМО (1)–(2), для яких потрібно зignorувати зону відпотівання (тобто покласти $\lambda_0 = 0$) при відомих умовах на виході зі штабеля ($x = h$):

$$t_r(h) = t_0 + 0,5, \quad \phi(h) = 0,96 \quad (p(h) = 606,2 \text{ Па}). \quad (12)$$

Необхідно визначити відносну вологість та швидкість повітря на вході в штабель.

Дана задача – це зворотна крайова задача. З розв'язку рівнянь (1)–(2) при $\lambda_0 = 0$ (рис. 2), враховуючи умови (12), знаходимо

$$t_r(\bar{h}) = C_1 \exp(\lambda_1 \bar{h}) + C_2 \exp(\lambda_2 \bar{h}) + t_* = 0,5, \quad (13)$$

$$p(\bar{h}) = C_1 p_1 \exp(\lambda_1 \bar{h}) + C_2 p_2 \exp(\lambda_2 \bar{h}) + (m_p + n_p t_*) = 606,21$$

чи, виключивши p_0 з (13), маємо рівняння відносно швидкості повітря V

$$(n - p_2 m) \exp(-\lambda_1 \bar{h}) - (n - p_1 m) \exp(-\lambda_2 \bar{h}) = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{b} t_*, \quad (14)$$

тут величини $p_1, p_2, \lambda_1, \lambda_2, b, h$ – відомі функції V .

Результати розрахунку оптимальних режимів показано на рис.3 та рис.4.

Активне вентиляція насипу продукції забезпечує найсприятливіші

умови для тривалого її зберігання. Тим часом більшість діючих тепер холодильних камер плодоовочесховищ устатковані підвісними чи постаментними повітроохолоджувачами. Через великий аеродинамічний опір штабельних елементів (пакети ящиків, контейнери) повітродіподіл в штабелі проходить в ос-

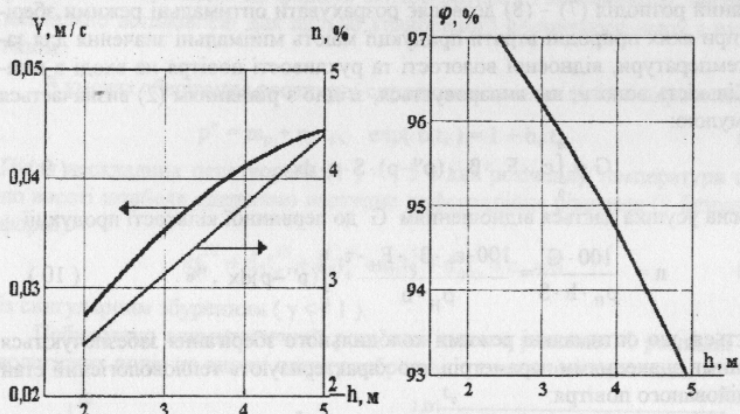


Рис. 3. Графік зміни оптимальних значень швидкості V та природних втрат від висоти штабеля продукції (яблука).

Рис. 4. Характер залежності оптимальних значень відносної вологості повітря на вході в штабель.

новному за рахунок просвітів між елементами, а при нераціональному штабелюванні для певної частини штабеля вимушене вентиляування взагалі відсутнє. В такому випадку тепло- та вологовідведення від елементів сировини виходить в основному природною конвекцією. Це ж має місце також і тоді, коли використовуються вентилятори системи охолодження.

Швидкість природної конвекції для щільно улакованого шару, як відомо, визначається за законом Дарсі

$$\frac{\partial p}{\partial x} - \rho \cdot g = \frac{\mu}{k} \cdot V, \quad (15)$$

де $k = k(V)$ – коефіцієнт проникливості, а щільність повітря дорівнює

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 - \beta_t \cdot (t_r - t_0) - \beta_p \cdot (p - p_0)], \quad (16)$$

та
$$\beta_t = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_p = \frac{1}{T}, \quad \beta_p = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_t = \frac{0.3786}{p - 0.3786p} \quad (17)$$

В результаті (15), з використанням формули Ергуна для коефіцієнта проникливості, приводиться до квадратного рівняння відносно швидкості конвекції, звідки

$$V = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4 \cdot a_2 \cdot a_0}}{2 \cdot a_2} \quad (18)$$

У виразі (18) коефіцієнт a_0 залежить від середніх значень температури повітря \bar{t}_r та парціального тиску пари \bar{p} , тому швидкість конвекції V потрібно визначати спільно з рівняннями ТМО (1)-(2). Ця задача вирішується методом ітерацій.

На рис. 5 зображена залежність швидкості повітря V в штабелі від висоти штабеля при різній відносній вологості проточного повітря. На рис.6 зображена залежність середньої температури повітря від висоти штабеля. На кожному з рисунків криві 1, 2, 3 та 4 відповідають значенням: 1- $\phi = 80\%$; 2 - $\phi = 90\%$; 3 - $\phi = 95\%$; 4 - $\phi = 100\%$.

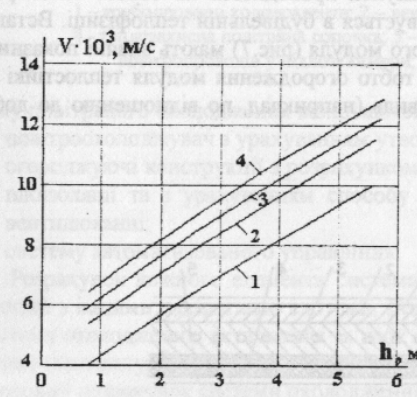


Рис. 5. Залежність швидкості повітря V в штабелі від його висоти.

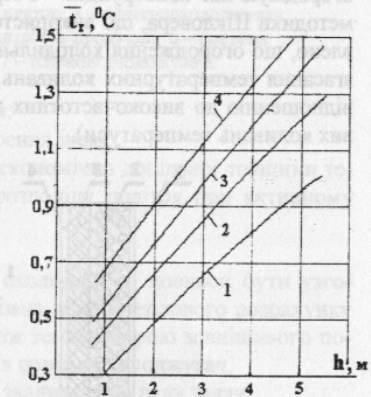


Рис. 6. Залежність середньої температури повітря від висоти штабеля.

Отримані результати дозволяють оцінити зміну температури сировини по висоті штабеля в тих його областях, де відсутнє примусове вентиляування.

У розділі 2 проведений тепловий розрахунок і теплоісткість огорожуючих конструкцій модуля плодоовочесховища. 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.

Економічно доцільний опір теплопередачі огорожуючої конструкції визначається зазвичай, виходячи з умови забезпечення найменших приведених витрат ПВ, \$ / м³, які визначаються за формулою:

$$PB = C_d + \frac{(t_H - t_B) z_H m C_T l_T}{R_0 E_{H,II}} = C_d + \frac{k}{R_0} \quad (19)$$

З умови мінімуму $PB = \Pi(\delta_{из}) \left(\frac{\partial \Pi}{\partial \delta_{из}} = 0 \right)$ одержано наступне значення товщини термоізоляції:

$$\delta_{из}^{жк} = \sqrt{\frac{k \cdot \lambda_{из}}{C_{из}} - \bar{R}_0 \cdot \lambda_{из}} \quad (20)$$

Проведений розрахунок економічно доцільної товщини теплоізоляції для огорожень холодильного модуля (рис. 7) в умовах жаркого клімату Йорданії.

Встановлено, що огорожуючі конструкції холодильного модуля мають добрі теплозахисні властивості. Досліджується теплостійкість розглянутих огорожуючих конструкцій. Розрахунок проводиться на основі інженерної методики Шкловера, що використовується в будівельній теплофізиці. Встановлено, що огороження холодильного модуля (рис. 7) мають значні показники згасання температурних коливань, тобто огороження модуля теплостійкі по відношенню до високочастотних хвиль (наприклад, по відношенню до добових коливань температури).

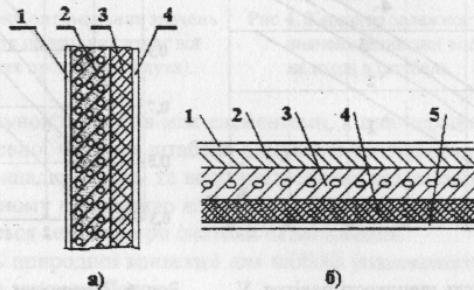


Рис. 7. Конструкція стін та покриття холодильного модуля.
а) стіна: 1 – штукатурка; 2 – панель залізобетонна; 3 – ізоляція; 4 – лист сталевий оцинкований.
б) покриття: 1 – 3 шари гідроізоля; 2 – бетонна стяжка; 3 – плита залізобетонна; 4 – ізоляція; 5 – лист сталевий оцинкований.

У розділі 3 проведений тепловий розрахунок системи охолодження камери зберігання (Рис. 8). Під охолоджуючою камерною системою розуміємо комплекс засобів та обладнання, що забезпечують у приміщенні камери стабільні оптимальні тепловологісні режими зберігання. Огорожуючі конструкції камер зберігання холодильників не забезпечують потрібну теплостійкість щодо низькочастотних температурних хвиль. В умовах жаркого клімату при значних теплоприпливах через огороження, які змінюються з часом, у систе-

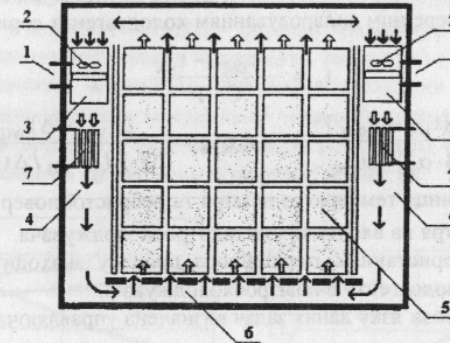


Рис. 8. Схема камери з теплозахисною повітряною сорочкою.
1 – трубопроводи холодоагента; 2 – вентилятор; 3 – повітроохолоджувач;
4 – теплозахисна повітряна сорочка; 5 – штабель продукції; 6 – система повітропроводів у підлозі камери; 7 – плівкові зволожувачі.

тому повітряного охолодження включаються:

- повітроохолоджувач з урахуванням утворення інею;
- огорожуючі конструкції з розрахунком економічно доцільної товщини теплоізоляції та з урахуванням способу розподілу повітря при активному вентиляванні;
- систему автоматизованого управління.

Розрахунок кожного елемента системи охолодження повинен бути узгоджений з іншими елементами системи. Головна задача теплового розрахунку системи охолодження: встановити зв'язок між температурою зовнішнього повітря і температурою холодоагента на вході в повітроохолоджувач.

Тепловий розрахунок системи охолодження зводиться до ряду задач:

- тепловий розрахунок теплозахисної сорочки;
- тепловий розрахунок огорожень та визначення економічно доцільної товщини теплоізоляції;
- тепловий розрахунок камери зберігання;
- тепловий розрахунок повітроохолоджувача.

Теплові розрахунки повітряної теплозахисної сорочки, огорожуючих конструкцій та камери зберігання проводяться традиційними методами.

Проведений розрахунок економічно доцільної товщини теплоізоляції з врахуванням теплозахисної сорочки. Тепловий розрахунок камери зберігання дозволив визначити загальну кількість зовнішніх і внутрішніх теплоприпливів з метою підбору камерного холодильного обладнання та компресора.

При розрахунку повітроохолоджувача з урахуванням утворення інею спочатку за методом Чукліна визначається коефіцієнт тепловіддачі k через ребристу поверхню. А температура випаровування холодоагента розраховується

за методом Баркалова, згідно з яким потрібна температура для повітроохолоджувачів з безпосереднім випаровуванням холодоагента дорівнює

$$t_a = \frac{C \cdot t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}}}{C - 1}, \quad (21)$$

де $\lg C = \frac{k \cdot (t_{\text{ВХ}} - t_{\text{ВЫХ}})}{2,3 \cdot \alpha_{\text{пр}}^{\text{нп}} \cdot \Delta t_{\text{ГВ}}}$, $\Delta t_{\text{ГВ}} = \frac{\Delta t_{\text{ВН}} - \Delta t_{\text{ВП}}}{2,3 \cdot \lg(\Delta t_{\text{ВН}} / \Delta t_{\text{ВП}})}$ - середня

логарифмічна різниця температур повітря та ребристої поверхні; $t_{\text{ВХ}}$, $t_{\text{ВЫХ}}$ - температура повітря на вході і виході повітроохолоджувача.

Потім з використанням ітераційного процесу знаходиться температура випарювання холодоагента в повітроохолоджувачі.

В результаті розв'язку даних задач визначена управляюча функція:

$$t_a = f(t_H), \quad (22)$$

за допомогою можливо організувати автоматизоване управління холодопродуктивністю повітроохолоджувача в залежності від змінної з часом температури зовнішнього повітря при її низькочастотній зміні (наприклад, сезонні або менш короткочасні коливання температури).

Розділ 4 присвячений дослідженню оптимальних режимів роботи холодильної установки з використанням методу термoeкономічного аналізу. Було розглянуто роботу одноступінчатої холодильної установки безпосереднього випарювання з проточною системою водопостачання, термoeкономічну модель якої зображено на рис. 9. Оптимізація режимів роботи цієї установки проводиться традиційним методом, розробленим в галузі холодильної техніки В. В. Оносовським.

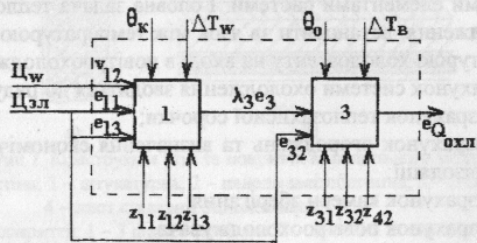


Рис. 9. Термoeкономічна модель одноступінчатої холодильної установки

Розглянуто оптимізацію процесів охолодження, яка зводиться до визначення мінімального значення приведених витрат (без урахування зволожуючого обладнання):

$$ПВ = [C_{\text{эл}} \cdot (e_{11} + e_{13} + e_{22}) + C_w \cdot v_{12} + z_{11} + z_{12} + z_{13} + z_{21} + z_{22}] \cdot \tau \quad (23)$$

$$\text{чи } ПВ = ПВ(\theta_K, \Delta T_w, \theta_0, \Delta T_b). \quad (24)$$

тут θ_K, θ_0 - температурні напори в конденсаторі та охолоджувачі; ΔT_w - перепад температур у конденсаторі; ΔT_b - перепад температур повітря в повітроохолоджувачі. Задача оптимізації приведених витрат ПЗ (24) розв'язується методом невизначених множників Лагранжа. Розрахунки показали, що для оптимальних режимів роботи холодильної установки напори θ_K та θ_0 і перепади температур ΔT_w та ΔT_b суттєво залежать від взятого числа годин роботи холодильної установки. Ці залежності наведені на рис. 10.

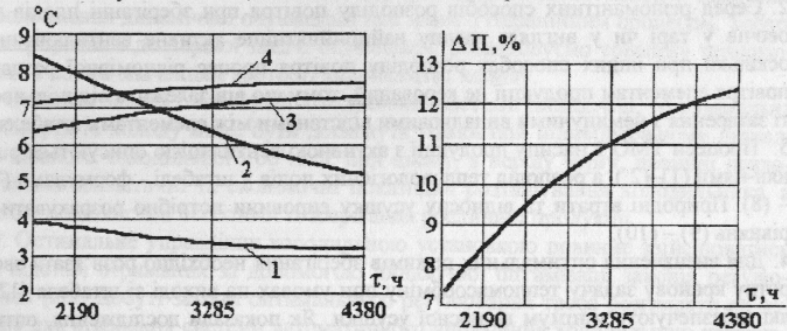


Рис.10. Залежність оптимальних температурних напорів від числа годин праці:

1 - θ_K ; 2 - θ_0 ; 3 - ΔT_w ; 4 - ΔT_b .

Рис.11. Залежність відносної економії приведених витрат від тривалості роботи холодустановки.

На рис.11 зображено економію приведених витрат, до якої входять змінна амортизаційних відрахувань на ремонт та енергетичні витрати. Тобто зменшення числа годин роботи приводить до підвищення оптимальних значень температурних напорів, що перевищує (на 35 - 50%) зазвичай рекомендовані значення. Звідки випливає, що оптимізація режиму роботи обладнання холодильної установки дозволяє скоротити змінну частину витрат приблизно на 10-12 %, що при тривалій експлуатації обладнання дає значну економію. У роботі також був проведений аналіз залежності приведених витрат ПВ від співвідношення цін на воду та електроенергію. Проведений комп'ютерний експеримент із зміною ціни на воду (при постійній ціні на електроенергію). Залежність ПВ (та інших параметрів) від співвідношення цін виявилася досить сильною.

У додатку до дисертаційної роботи наведені програми розрахунку.

Загальні висновки та рекомендації:

1. Плодоовочева продукція вельми чутлива до змін температури та відносної вологості повітря в камері зберігання. Для успішного тривалого зберігання певного виду сировини необхідно забезпечити в штабелі продукції однорідні

та стабільні тепловологісні умови. А щоб оцінити ефективність того чи іншого способу повітряного кондиціонування, необхідне локальне уявлення про тепловологісний стан системи "повітря – сировина" в усьому штабелі продукції. Таке дослідження можливе тільки на основі математичного моделювання процесів тепломасообміну (ТМО), що проходять у масі сировини. Математичне моделювання є також основою визначення оптимальних режимів зберігання продукції з мінімумом її природних втрат.

2. Серед різноманітних способів розподілу повітря при зберіганні плодів та овочів у тарі чи у вигляді насипу найприйнятніше активне вентильовання, оскільки при інших способах розподілу повітря процес рівномірної роздачі повітря елементам продукції не керований, тому що він залежить від щільності затарення з неминучими випадковими відстанями між елементами штабеля.

3. Процеси ТМО в насипу продукції з активною вентиляцією описуються рівняннями (1)–(2), а розподіл тепловологісних полів у штабелі - формулами (7) – (8). Природні втрати та відносну усушку сировини потрібно розрахувати з рівнянь (9) – (10).

4. Для визначення оптимальних режимів зберігання необхідно розв'язати зворотню крайову задачу тепломасообміну при умовах на виході зі штабеля (12), які забезпечують мінімум відносної усушки. Як показали дослідження, оптимальні значення швидкості кондиційованого повітря та його відносна вологість на вході в штабель повинні визначатись відповідно до формул (13) – (14).

5. У відношенні до насипу сировини дослідження оптимальних режимів - внутрішня задача зберігання. Не менш важлива зовнішня задача, яка зводиться до забезпечення стабільних оптимальних умов зберігання системи повітряного охолодження в присутності динамічно змінних теплових припливів через огороження камер зберігання. А задача розрахунку системи охолодження плодощових - це задача динамічної оптимізації. У першому наближенні (на першому етапі дослідження) вона може бути зведена до двох незалежних задач:

- визначення товщини теплоізоляції огорожень при заданій вартості виробництва холоду;
- оптимізації режимів роботи холодильної системи з заданою товщиною теплоізоляції.

6. Під час розв'язування першої задачі проводиться тепловий розрахунок та теплостійкість багатопарових огорожуючих конструкцій і визначається економічно доцільна товщина теплоізоляції. Товщину теплоізоляційного шару потрібно визначати за формулою (20).

7. Друга задача динамічної оптимізації холодильної системи зводиться до теплового розрахунку внутрішньокамерної охолоджувальної системи, яка підтримує оптимальні тепловологісні параметри в насипу продукції з урахуванням способу повітродозподілу. Визначається економічно доцільна товщина теплоізоляції огорожень та проводиться тепловий розрахунок камери збері-

гання з метою підбору холодильного обладнання. В результаті загального теплового розрахунку охолоджувальної камерної системи визначається залежність (22) температури кипіння холодоагенту від температури зовнішнього повітря, за якої в штабелі продукції підтримуються оптимальні умови.

8. На основі заданого значення товщини прошарку теплоізоляції та холодильного обладнання проводиться оптимізація режиму роботи холодильної установки та визначається мінімальна вартість виробництва холоду. Наступне продовження динамічної оптимізації пов'язане з ітераційним процесом. Тобто, повернувшись до першої задачі оптимізації, розраховуємо товщину теплоізоляції з новим значенням вартості виробництва холоду.

9. Оскільки задача оптимізації холодильної системи динамічна, то мінімальна собівартість холоду може бути досягнута тільки при індивідуальному підході до кожного холодильного об'єкта, при цьому, в першу чергу, повинні враховуватись кліматичні та економічні показники розташування холодильника, а також технологічні особливості зберігання рослинної продукції.

10. Оптимальне управління холодильною установкою повинне здійснюватись на підставі отриманих за допомогою динамічної оптимізації законів регулювання (22). Добуті закони оптимального регулювання треба розглядати як основу для створення системи автоматичного управління холодильною установкою.

Основний зміст дисертації викладений у працях:

1. Аль-Ахрас Гассан, Кириллов В.Х. Исследование процессов тепло- и массообмена в вентилируемой насыпи плодов и овощей // Материалы 60-й учебно-методической и научно-технической конференции, ОГАХ, Одесса. - 1995.- С.15
2. Аль-Ахрас Гассан, Кириллов В.Х., Варивода В.А., Красномовец П.Г. Математическое моделирование процессов тепломассообмена при холодильном хранении растительного сырья //1-ая Международная научно-практическая конференция "Математика та психологія у педагогічній системі" "Технічний університет", сб. статей, Одесса. - 1996.- С.69 .
3. Аль-Ахрас Гассан Математические описание процессов тепломассообмена при хранении плодовоошной продукции // Машинобудування. Придніпровський науковий вісник. №28(39), серпень 1997 р. , С.30-37.
4. Ghassan Al-Akhras, V. Cherpurnenko, A. Lipa. The intensive heat- and mass exchange Installation for the evaporative cooling of water and contact processing of air // Proceedings of the 97' International Compressor technique Conference.- China.-1997.- P. 287-289 .
5. M.H.Al-Alami, A.H.Zeaiter, H.M.Moinnudin, G.K.Al-Akhras. Reducing working expenses of heat exchangers of refrigeration installation obtained by method of heat-saving analysis // Proc. 1998 Int. Refrig. Conf. Perdue Univ. - Perdue (USA). - 1998, 07.14-17. - p. 239 - 244.

6. Аль-Ахрас Гассан, Кириллов В.Х., Варивода В.А., Красномовец П.Г. Теплоустойчивость ограждающих конструкций холодильного модуля для хранения плодоовощной продукции // Холодильная техника і технологія. – 1999. - №2 (вып.59). - С. 69-72 .
7. Аль-Ахрас Гассан. Естественная конвекция воздуха в штабеле плодоовощной продукции // Холодильная техника і технологія.– 1999. - №4 (вып.61). - С.12-16 .
8. Аль-Ахрас Гассан. Тепловой расчет ограждающих конструкций холодильного модуля для хранения плодоовощной продукции // Холодильная техника і технологія.– 1999. - №5 (вып.62). - С.20-24.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

x – вісь координат, спрямована за ходом руху повітря, м; h – висота штабеля, м; $t_s(x)$, $t_r(x)$ – температура сировини та повітря, $^{\circ}\text{C}$; $p(x)$ – парціальний тиск пари, Па; p – тиск насиченої пари, Па; $P_{\text{вср}}$ – барометричний тиск, Па; ϕ – відносна вологість повітря, %; V – швидкість повітря, м/с; q_0 – питома теплота дихання при 0°C , Вт/кг; b_s – температурний коефіцієнт швидкості дихання, $1/^{\circ}\text{C}$; λ_0 – ефективна теплопровідність насипу сировини, Вт/(м град); ρ_s , ρ_r – щільність насипу сировини та повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м^2 град); β_p – коефіцієнт масовіддачі, с/м; γ – теплота пароутворення, Дж/кг; ε – пористість насипу сировини; ε_f – масообмінна характеристика - доля поверхні елемента сировини, що бере участь в масообміні; F_H – поверхня плодів (овочів) на одиницю об'єму, $\text{м}^2/\text{м}^3$; λ_i – характеристичні числа, $1/\text{м}$; G – кількість вологи, що випарюється, кг; n – відносна усушка продукції; ПВ – приведені витрати; C_D – собівартість будівельно-монтажних робіт для плиткового ізоляційного матеріалу, $\$/\text{м}^2$; C_T – вартість виробництва холоду, $\$/\text{ккал}$.

Аль-Ахрас Гассан Халед Мохаммед «Теплофізичні аспекти холодильного зберігання плодоовочевої продукції в умовах жаркого клімату».- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.04.03 – Холодильна та криогенна техніка, системи кондиціювання.- Одеська державна академія холоду, Одеса, 1999.

Теоретично досліджуються процеси тепло- та масообміну в насипу продукції внаслідок її активного вентиляції холодним повітрям. Проведено наукове обґрунтування оптимальних режимів зберігання рослинної сировини. Теоретично вивчена теплопередача і теплостійкість огороджуючих конструкцій камери зберігання. Проведено дослідження процесів теплопередачі в основних елементах камерної системи охолодження та розроблено методику динамічної оптимізації холодильної системи.

Ключові слова: насип плодоовочевої продукції; процеси тепло – та масообміну; природні втрати; оптимальні режими зберігання; огорожуючі конструкції; система охолодження; динамічна оптимізація.

Аль-Ахрас Гассан Халед Мохаммед «Теплофизические аспекты холодильного хранения плодоовощной продукции в условиях жаркого климата».- Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.04.03 – Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования.- Одесская государственная академия холода, Одесса, 1999.

В вступной части работы рассмотрены особенности хранения плодов, выращиваемых в Иордании и проведен краткий обзор литературных источников по холодильному хранению растительного сырья. Определены основные задачи исследования.

В главе 1 проведено математическое моделирование процессов тепло- и массообмена, происходящих при хранении растительного сырья в штабеле при его активном вентилировании холодным воздухом. Коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи для насыпи продукции определяются соответственно формулами Зенера-Бауэра и Гнелинского. Исходная краевая задача приводится к обыкновенному дифференциальному уравнению четвертого порядка с сингулярным возмущением. Построено асимптотическое решение и получено распределение тепловлажностных полей по высоте штабеля.

На основе исходной математической модели определены оптимальные режимы хранения растительного сырья, обеспечивающие минимальные естественные потери. При этом по условиям на выходе из штабеля продукции решается обратная краевая задача и определяются тепловлажностные характеристики приточного воздуха.

Теоретически исследуется тепломассообмен в штабеле при естественной конвекции воздуха.

В главе 2 проведен тепловой расчет и исследуется теплоустойчивость ограждающих конструкций модуля плодоовощехранилища. Для поддержания оптимальных режимов хранения рассчитана экономически целесообразная толщина слоя теплоизоляции.

В главе 3 проводится тепловой расчет охлаждающей системы камеры хранения, состоящий из ряда взаимосвязанных задач теплового расчета теплозащитной воздушной рубашки, ограждений, камеры хранения и воздухоохладителя. В результате определена управляющая функция, устанавливающая связь между температурой кипения хладагента в воздухоохладителе и температурой наружного воздуха.

В главе 4 разработана методика динамической оптимизации холодильной системы. На первом этапе по заданной стоимости производства холода определяется экономически целесообразная толщина теплоизоляции ограждений,

затем, на основании теплового расчёта камеры хранения подбирается холодильное оборудование и проводится расчёт оптимальных режимов работы холодустановки. В результате определяется минимальная стоимость производства холода. Далее эта итерационная процедура повторяется, т.е. проводится расчёт толщины теплоизоляции с новым значением стоимости производства холода и далее рассчитываются оптимальные режимы работы холодустановки.

В выводах отмечено, что получены новые научно обоснованные результаты, позволяющие снизить естественные потери растительного сырья при его хранении в условиях жаркого климата при минимальных приведенных затратах на производство холода.

В приложении содержатся программы расчёта.

Ключевые слова: насыпь плодоовощной продукции; процессы тепло – и массообмена; естественные потери; оптимальные режимы хранения; ограждающие конструкции; система охлаждения; динамическая оптимизация.

Gassan Khaled Mohammed Al-Akhras "Thermophysical Aspects of Fruit-and-Vegetable Products Cold-Storage Under Hot-Climate Conditions".- Manuscript.

The thesis for the scientific degree of a Candidate of Sciences (engineering) on Speciality 05.04.03 – Refrigeration and Cryogenic Engineering, Air-Conditioning Systems. Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 1999 .

Heat-and-mass exchange processes in a stack of products actively ventilated by a cold air are theoretically investigated. A scientific substantiation of the optimum regimes for a vegetable product cold storage has been given. Heat transfer and heat stability of the protective construction of a storage chamber have been theoretically studied. Investigation in the heat-transfer processes in the main elements of a cooling chamber system have been carried out and the technique for a dynamic optimization of a cooling system has been developed.

Key words: a stack of fruit-and-vegetable products; heat-and-mass exchange processes; natural losses; optimum regimes of storage; protective constructions; a cooling system; a dynamic optimization.

xv 860

