

DOI : 10.33274/2079-4827-2020 -41-2-64-70

УДК [664.8.032:635.1/.8]: [66.021.4:621.565] (045)

*Мельник О. Є., канд. техн. наук¹**Омельченко О. В., канд. техн. наук¹**Цвіркун Л. О., канд. пед. наук¹*

¹ Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського (м. Кривий Ріг, Україна), e-mail: melnik@donnuet.edu.ua

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ
ПІД ЧАС КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ В ХОЛОДИЛЬНИХ КАМЕРАХ
ПЛОДООВОЧЕСХОВИЩА**

UDC [664.8.032:635.1/.8]: [66.021.4:621.565] (045)

*Melnyk O. E., PhD in Technical sciences¹**Omelchenko O. V., PhD in Technical sciences¹**Tsvirkun L. A., PhD in Pedagogical sciences¹*

¹ Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: melnik@donnuet.edu.ua

**RESEARCH OF HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES
DURING AIR CONDITIONING IN REFRIGERATED CHAMBERS OF FRUIT-
AND-VEGETABLE STORAGE**

Мета. Метою статті є дослідження тепломасообмінних процесів під час кондиціювання повітря в холодильних камерах плодоовочесховища.

Методи. У роботі для удосконалення технології зберігання овочів та фруктів, раціональних способів зниження втрат розглянуто тепломасообмінні процеси, які невід'ємно пов'язані з теплофізичними методами, що відбуваються в овочесховищі, та властивостями рослинної сировини, за результатами яких можна визначити оптимальні умови зберігання різних сортів овочів та фруктів.

Результати. Зазначено, що для камер зберігання овочів та фруктів вкрай важливим є регулювання необхідної вологості задля зниження швидкості висушування продукції, що зберігається. При цьому вважають, що головним завданням кондиціювання повітря є виконання технологічних вимог щодо створення сприятливих умов: бродіння тіста й опари на хлібо заводах, ферментації чаю на чайних фабриках, пророщування солоду на пивзаводах, дозрівання сиру на сирзаводах, зберігання м'ясних і ковбасних виробів на м'ясокомбінатах. Для удосконалення технології зберігання овочів та фруктів, раціональних способів зниження втрат продуктів було розглянуто тепломасообмінні процеси, що відбуваються в овочесховищах. Аналіз показав, що тепломасообмінні процеси невід'ємно пов'язані з теплофізичними методами та властивостями рослинної сировини, за результатами яких можна визначити оптимальні умови зберігання різних сортів овочів та фруктів. Вважається, що поточні параметри мікроклімату в сховищах залежать від великої кількості чинників, багато з яких є змінними, що пов'язане зі змінами в часі біологічного середовища і мінливістю температури, вологовмісту, швидкості руху, тиску зовнішнього повітря тощо. Розглянуто холодильне та вентиляційне обладнання, яке підтримує в холодильній камері оптимальну температуру і рівень вологості. Сконцентровано увагу на тому, що під час зберігання необхідно враховувати особливості кожного продукту та їх сумісність при короткостроковому і тривалому зберіганні; режими зберігання визначені температурою, відносною вологістю і швидкістю руху повітря і мають бути постійні та рівномірно розподілені по об'єму камери. Наведено графік залежності теплофізичних показників рослинної сировини, наприкладі патисону, від вологості (W), а саме температуропровідність (a), теплопровідність (λ) і теплоємність (c). За результатами інтерпретовано, що всі константи в межах вологості

Надійшла до редакції 02.11.2020 р.

© О. Є. Мельник, О. В. Омельченко,
С. Л. Цвіркун, 2020

від 70 % до 80 % зменшуються, а після 80 % вологості коефіцієнти теплоємності і теплопровідності знову зростають, проте коефіцієнт температуропровідності продовжує зменшуватися за лінійним законом, що свідчить про те, що зі зростанням вологості спостерігається підвищення розглянутих констант.

Ключові слова: кондиціювання повітря, температурно-вологісні режими, тепломасообмінні процеси, теплофізичні показники, холодильна камера, овочесховище.

Постановка проблеми. Технологічне кондиціювання повітря, підтримання його параметрів в заданих межах широко застосовується у харчовій промисловості. Для камер зберігання овочів та фруктів вкрай важливим є урегулювання необхідної вологості задля зниження швидкості висушування продукції, що зберігається. В. Муратов наголошує, що головним завданням кондиціювання повітря є виконання технологічних вимог щодо створення сприятливих умов: бродіння тіста і опари на хлібозаводах, ферментації чаю на чайних фабриках, пророщування солоду на пивзаводах, дозрівання сиру на сирзаводах, зберігання м'ясних і ковбасних виробів на м'ясокомбінатах [1]. Створення та підтримка заданого технологічного температурно-вологісного режиму в приміщенні дозволяє забезпечити необхідну якість кінцевого продукту, бо недотримання відповідних режимів у процесі, наприклад, дозрівання копчених ковбас в камерах сушки призводить до зниження понад 21 % середньозваженої вологості продукції.

Так, у цехах кондитерського виробництва застосовують установки технологічного кондиціювання повітря для охолодження поточних ліній виробництва кондитерської продукції, які працюють на повній рециркуляції в теплу пору року, на зовнішньому повітрі — в холодну пору року і з частковою рециркуляцією — в перехідний час року. Недостатньо швидке охолодження карамелі атмосферним повітрям знижує влітку вироблення поточних ліній на 25–30 % [2]. Відповідно, вологість повітря — важливий параметр, який необхідно контролювати у процесі зберігання, особливо для листових овочів і м'яких фруктів, оскільки у них досить значна усушка.

Важливим чинником, що впливає на ефективне зберігання плодів і овочів, є рух повітря (повітрообмін) в камерах зберігання, що забезпечує відведення тепла, яке виділяється при диханні рослинної сировини. Недотримання оптимального температурно-вологісного режиму може призвести до псування продукції, зниження вмісту кисню або підвищення концентрації CO₂ [3]. Відповідно, для забезпечення певного мікроклімату необхідно підтримувати оптимальний баланс, що вимагає дослідження температурно-вологісних режимів повітря в холодильних камерах плодоовочесховища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконалення технології зберігання овочів та фруктів, раціональних способів зниження втрат продуктів вимагає дослідження тепломасообмінних процесів, що відбуваються в овочесховищах. Зазначені процеси невід'ємно пов'язані з теплофізичними методами та властивостями рослинної сировини, за результатами яких можна визначити оптимальні умови зберігання різних сортів овочів та фруктів. Необхідні поточні параметри мікроклімату в сховищах залежать від великої кількості чинників, багато з яких є змінними, що пов'язане зі змінами в часі біологічного середовища і мінливістю температури, вологовмісту, швидкості руху, тиску зовнішнього повітря тощо. На значення теплофізичних показників впливають температуропровідність (α), теплопровідність (λ) і теплоємність (c).

Відповідно, теплофізичні характеристики продуктів є основними величинами при розрахунках технологічних процесів, в яких відбувається охолодження, нагрівання або заморожування. Одним з головних показників режиму зберігання рослинної сировини є температура і відносна вологість повітря. Тому зберігання овочів має здійснюватися з упровадженням систем клімат-контролю і вентиляції, що дозволить підтримувати продукт в потрібному стані. Для овочесховищ великих розмірів застосовується спеціальне обладнання, здатне функціонувати протягом тривалого часу, виключаючи можливість усушки, гниття і псування продуктів у результаті неправильного мікроклімату всередині овочесховища.

Як відомо, овочесховища за типом повітряної обробки поділяються на два типи: з природною і примусовою (активною) вентиляцією. При зберіганні в умовах природної вентиляції температура зовнішнього повітря має бути нижче температури закладеної на зберігання продукції, а під час використання активної вентиляції з'являються можливості її регулювання, оптимізації процесів просушування вологої продукції, відведення вологи і вуглекислого газу тощо. При тривалому зберіганні активне вентилявання призводить до суттєвих втрат маси плодовоовочевої продукції через усушки. Тому виникає потреба в підвищенні ефективності систем кондиціювання повітря шляхом зменшення енерговитрат, пов'язаних з удосконаленням процесу тепловологісної обробки повітря в різні періоди року, та відповідних способів і засобів розподілення повітря, що дозволяє забезпечити подачу і розподіл повітря в приміщеннях відповідно до технологічних умов [4; 5]. Однією з найважливіших умов зберігання овочів є підтримання оптимальної температури. Для виконання цієї умови використовують установки рециркуляції, які дозволяють підігрівати припливне повітря до потрібної температури в холодну пору року.

Теплофізичні методи дозволяють побудувати математичні моделі для вивчення конкретних процесів, а саме розподіл температури та відносної вологості повітря в приміщенні, за допомогою технологічного обладнання (теплообмінники, холодильні машини, камери зволоження), в насипах або контейнерах з продукцією, враховуючи фізико-механічні властивості об'єктів зберігання (теплова інерційність та здатність до виділення вологи і фільтрації повітря) [6]. Тому під час кондиціювання повітря поряд з контактними теплообмінниками широко застосовуються поверхневі теплообмінники, які використовуються в якості повітрянагрівачів для сухого нагріву повітря і як повітроохолоджувачі, що можуть працювати в режимі сухого охолодження та в мокрому режимі [7]. В умовах стаціонарного тепломасопереносу в рекуперативному теплообміннику для α -моделі застосовуються рівняння для температури, ентальпії і вологого повітря:

$$\frac{dt}{dx} = n_t (t_f - t); \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dx} = N_t (I_f - I); \quad (2)$$

$$\frac{dd}{dx} = n_m (d_f - d); \quad (3)$$

де t_f , I_f , d_f — відповідні температура, °C; ентальпія, кДж/кг; вологість вологого повітря, г/кг сух. пов., біля поверхні теплообмінника.

Найбільш точно процеси тепломасообміну відтворюються на основі системи рівнянь Рейнольдса [8]. Система рівнянь для опису процесу перенесення на основі одновимірної α -моделі включає:

— рівняння руху

$$\frac{du_\phi}{d\tau} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d(u^2)}{dx} = -\frac{1}{\rho_B} \cdot \frac{d}{dx} \left(\xi \cdot \frac{u^2}{2} \right); \quad (4)$$

— рівняння нерозривності

$$\frac{d\rho}{d\tau} + \frac{d(\rho u)}{dx} = 0; \quad (5)$$

— рівняння балансу теплової енергії

$$\frac{1}{u} \cdot \frac{dt}{d\tau} + \frac{dt}{dx} = \frac{\alpha_t F_{y\phi}}{(c_p \rho_s)_t u \Pi} (t_{nos} - t_s); \quad (6)$$

— рівняння балансу маси речовини в потенціалах вологості або вмісту вологи

$$\frac{1}{u} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} + \frac{d\theta}{dx} = \frac{\alpha_t F_{y\partial}}{(c_{\theta} \rho_{\theta})_{\theta} u \Pi} (\theta_{нов} - \theta_{\theta}); \quad (7)$$

$$\frac{1}{u} \cdot \frac{\partial d}{\partial \tau} + \frac{\partial d}{\partial x} = \frac{\alpha_d F_{y\partial}}{\rho_{\theta} u \Pi} (d_{нов} - d_{\theta}), \quad (8)$$

де φ_x — проекція щільності масових сил на вісь x ; $F_{y\partial}$ — площа поверхні на 1 м довжини, м².

Аналіз наведених диференціальних рівнянь руху (4), теплової енергії (5–6), балансу маси речовини в потенціалах вологості (7) або вмісту води (8) дозволяє зробити висновок про складну багатофакторну залежність температурно-вологісного режиму в овочесховищі.

Мета статті — дослідження тепломасообмінних процесів під час кондиціювання повітря в холодильних камерах плодоовочесховища.

Виклад основного матеріалу дослідження. Холодильна камера для зберігання овочів (овочесховище) — це комплекс холодильного та вентиляційного обладнання, яке підтримує в холодильній камері оптимальну температуру і рівень вологості, перешкоджає високій концентрації продуктів дихання овочів у камері [9]. Холодильна система і система вентиляції використовуються для досягнення одного результату — зменшення втрати продукції у процесі зберігання. Під час зберігання необхідно враховувати особливості кожного продукту та їх сумісність при короткостроковому і тривалому зберіганні. Окрім того, режими зберігання визначені температурою, відносною вологістю і швидкістю руху повітря і мають бути постійні та рівномірно розподілені по об'єму камери.

Плоди та овочі відносяться до продуктів, які швидко псуються, але мають використовуватися в харчуванні протягом року незалежно від сезону. Для збільшення терміну їх зберігання потрібна спеціальна обробка та відповідна технологія зберігання. Рекомендовані терміни і режими зберігання плодоовочевої продукції, наведені в табл. 1 [10].

Таблиця 1 — Терміни і режими зберігання плодоовочевої продукції

Овочі та фрукти	Температура, °C	Відносна вологість повітря, %	Термін зберігання
Баклажани	7 – 10	85–90	до 10 днів
Кабачки	0 – 4	85–90	до 2 місяців
Картопля	+2 – 4	85–95	4–8 місяців
Лук ріпчастий	–2...+1	70–85	4–8 місяців
Морква	–0,5...+5	90–95	4–6 місяців
Патисони	0	90–95	2–4 місяця
Петрушка	0 – 1	85–90	1–2 місяця
Буряк	0	90–95	3–5 місяців
Часник	–1– 0	70–75	6–7 місяців
Виноград	0,5...–2	90–95	2–3 місяця
Слива	–1	–	2–3 тижні

Температура та вологість повітря в камері визначаються як середньоарифметичні значення між параметрами на вході в камеру t_{k1} , φ_{k1} і на виході з камери t_{k2} , φ_{k2} [6]:

$$t_k = 0.5 \cdot (t_{k1} + t_{k2}), \quad \varphi_k = 0.5 \cdot (\varphi_{k1} + \varphi_{k2}). \quad (9)$$

Отримаємо

$$\Delta G = (b_0 + 0.5 \cdot b_1 \cdot t_{k1} - 0.5 \cdot b_2 \cdot \varphi_{k1}) + b_1 \cdot t_{k2} - b_2 \cdot \varphi_{k2} + b_3 \cdot G_v \quad (10)$$

$$B = b_0 + 0.5 \cdot b_1 \cdot t_{k1} - 0.5 \cdot b_2 \cdot \varphi_{k1}.$$

Технологічні параметри мікроклімату у сховищах забезпечуються системами підтримки параметрів мікроклімату.

Складові теплового та вологісного балансів у овочесховищі можуть бути рівні нулю, бути позитивними або негативними залежно від періоду року. Параметри на вході в камеру є постійними, бо регулюються засобами автоматики (рис. 1).

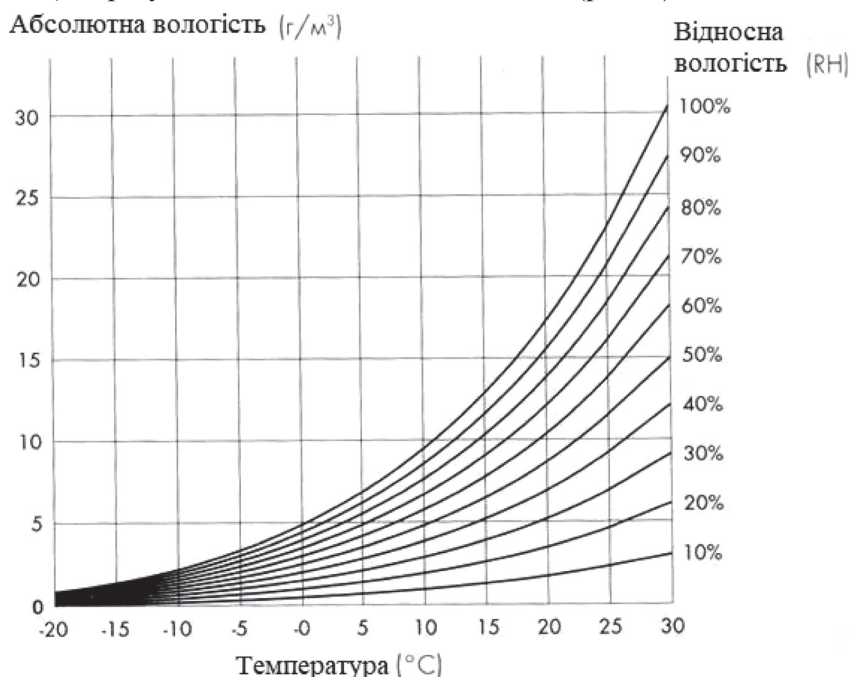


Рисунок 1 — Графік залежності температури від вологості повітря

Як відомо, відносна вологість залежить від температури: чим більше нагрівається повітря, тим нижче відносна вологість.

На значення теплофізичних показників овочів та фруктів впливає температуропровідність (α), теплопровідність (λ) і теплоємність (c). Графік залежності теплофізичних показників рослинної сировини, на прикладі патисону, від вологості (W), наведено на рис. 2.

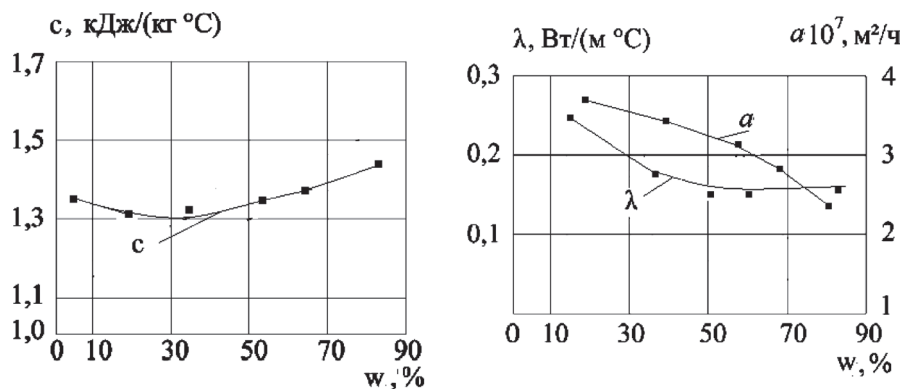


Рисунок 2 — Вплив вологості на теплофізичні характеристики патисону:
 α — температуропровідність; λ — теплопровідність; c — теплоємність

З графіку (рис. 2) видно, що всі константи в межах вологості від 70 % до 80 % зменшуються, після 80 % вологості коефіцієнти теплоємності і теплопровідності знову зростають, а коефіцієнт температуропровідності продовжує зменшуватися за лінійним законом, що свідчить про те, що зі зростанням вологості спостерігається підвищення констант.

Висновки. Отже, для камер зберігання овочів та фруктів вкрай важливим є регулювання необхідної вологості задля зниження швидкості висушування продукції, що зберігається. Створення та підтримка заданого технологією температурно-вологісного режиму в приміщенні дозволяє забезпечити необхідну якість кінцевого продукту. Задля удосконалення технології зберігання овочів та фруктів, раціональних способів зниження втрат продуктів було

розглянуто тепломасообмінні процеси, що відбуваються в овочесховищах, які невід'ємно пов'язані з теплофізичними методами та властивостями рослинної сировини.

Зазначено, що необхідні поточні параметри мікроклімату у сховищах залежать від великої кількості чинників, багато з яких є змінними, що пов'язане зі змінами в часі біологічного середовища і мінливістю температури, вологовмісту, швидкості руху, тиску зовнішнього повітря тощо. Тому під час зберігання необхідно враховувати особливості кожного продукту та їх сумісність при короткостроковому і тривалому зберіганні. Окрім того, режими зберігання визначені температурою, відносною вологістю і швидкістю руху повітря і мають бути постійні та рівномірно розподілені по об'єму камери.

Наведено графік залежності теплофізичних показників патисону від вологості (W), а саме температуропровідності (a), теплопровідності (λ) і теплоємності (c). За результатами видно, що всі константи в межах вологості від 70 % до 80 % зменшуються, а після 80 % вологості коефіцієнти теплоємності і теплопровідності знову зростають, проте коефіцієнт температуропровідності продовжує зменшуватися за лінійним законом, що свідчить про те, що зі зростанням вологості спостерігається підвищення констант.

Список літератури

1. Муратов В. Г. Автоматизированное управление микроклиматом в технологических процессах пищевых производств : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.07. Одесса, 2014. 184 с.
2. Поддержка микроклимата в кондитерском производстве. 26.11.2013. URL : <http://uash.com.ua/about/news/2111-confectionery-climate.html>.
3. ДСТУ ISO 2169:2003. Фрукти й овочі. Фізичні умови зберігання на холоді. Визначення та вимірювання. К. : Держспоживстандарт України, 2003.
4. Базилев Р. В. Повышение эффективности систем кондиционирования воздуха в помещениях переработки сырья на мясоперерабатывающих предприятиях : дис. ... канд. тех. наук : 05.04.03. М., 2006. 211 с.
5. Вентиляция овощехранилищ. URL : <https://ventall.ua/stati/vegivent/>.
6. Грищенко В. О. Автоматизація процесу керування холодильним обладнанням в плодоовочесховищах : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.07. К., 2016. 212 с.
7. Аверкин А. Г., Еремкин А. И. Совершенствование устройств тепловлажностной обработки воздуха и методов расчета климатотехники. Пенза : ПГУАС, 2015. 204 с.
8. Бодров В. И., Бодров М. В. Тепломассообмен в биологически активных системах (теория сушки и хранения). Н. Новгород : ННГАСУ, 2013. 145 с.
9. Холодильное оборудование. URL : <http://komplektushie/kholodilnye-kamery/kholodilnye-kamery-dlya-ovoshchej-ovoshchekhranilishcha>.
10. ДСТУ 8568:2015. Фрукти, овочі та продукти їх перероблення швидкозаморожені. Пакування, маркування, транспортування та зберігання. К. : Держспоживстандарт України, 2015.

References

1. Muratov, V. G. (2014). *Avtomatizirovannoye upravleniye mikroklimatom v tekhnologicheskikh protsessakh pishchevykh proizvodstv*. [Automated control of microclimate in technological processes of food production. Thesis of PhD in Engineering sciences]. Odessa, 184 p.
2. Рефкул Инжиниринг (2013). *Podderzhka mikroklimata v konditerskom proizvodstve* [Microclimate support in the confectionery industry]. Available at : <http://uash.com.ua/about/news/2111-confectionery-climate.html>.
3. DSTU ISO 2169:2003 *Frukty i ovochi. Fizychni umovy zberihannya na kholodi. Vyznachen-nya ta vymiryuvannya*. [Fruits and vegetables. Physical conditions of cold storage. Definition and measurement]. Kyiv, State consumer standard of Ukraine., 2003.
4. Bazylev, R. V. (2006). *Povysheniye effektivnosti sistem konditsionirovaniya vozdukha v po-meshcheniyakh pererabotki syr'ya na myasopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh* [Improving the efficiency of air conditioning systems in raw materials processing rooms at meat processing plants. Thesis of PhD in Engineering sciences]. Moscow, 211 p.

5. *Ventilyatsiya ovoshchekhranilishch* (2018). [Ventilation of vegetable stores]. Available at : <https://ventall.ua/stati/vegivent>.
6. Grishchenko, V. O. (2016). *Avtomatyzatsiya protsesu keruvannya kholodyl'nym obladnannya v plodoovocheskhovyschakh* [Automation of refrigeration equipment management process in fruit and vegetable storages. Thesis of PhD in Engineering sciences]. Kyiv, 212 p.
7. Averkin, A. G., Yeremkin, A. I. (2015). *Sovershenstvovaniye ustroystv teplovlazhnostnoy obrabotki vozdukha i metodov rascheta klimatekhniki* [Improvement of devices for heat and humidity treatment of air and methods for calculating climatic engineering]. Penza, PGUAS Publ., 204 p.
8. Bodrov, V. I., Bodrov, M. V. (2013). *Teplomassoobmen v biologicheskii aktivnykh sistemakh (teoriya sushki i khraneniya)* [Heat and mass transfer in biologically active systems (theory of drying and storage)]. N. Novgorod, NNGASU Publ., 145 p.
9. *Kholodil'noye oborudovaniye* [Refrigeration equipment]. Available at : <http://komplektushie/kholodilnye-kamery/kholodilnye-kamery-dlya-ovoshchej-ovoshchekhranilishcha>.
10. DSTU 8568:2015 *Frukty, ovochi ta produkty yikh pereroblennya shvydkozamorozheni. Pakuvannya, markuvannya, transportuvannya ta zberihannya* [Fruits, vegetables and processed products are quick-frozen. Packing, marking, transportation and storage]. Kyiv, State consumer standard of Ukraine, 2015.

Objective. *The purpose of the article is to study heat exchange processes during air conditioning in refrigerating chambers of fruit-and-vegetable storage.*

Methods. *In the work on improving the technology of storage of vegetables and fruits, rational ways to reduce losses, heat and mass transfer processes are considered, which are inextricably linked with thermophysical methods occurring in the vegetable storage and the properties of vegetable raw materials.*

Results. *It is noted that for the storage chambers of vegetables and fruits it is extremely important to regulate the necessary humidity to reduce the speed of drying for the preserved products. At the same time, it is considered that the main task of air conditioning is to meet technological requirements to create favorable conditions: fermentation of dough and mash in bakeries, fermentation of tea in tea factories, germination of malt in breweries, cheese ripening in cheese factories, storage of meat and sausage products. To improve the technology of storage of vegetables and fruits, rational ways to reduce food losses were considered the heat and mass transfer processes occurring in vegetable storages. The analysis showed that the heat and mass transfer processes are inextricably linked with thermophysical methods and properties of plant raw materials, the results of which can determine the optimal storage conditions for different varieties of vegetables and fruits. It is stated that the current parameters of the microclimate in storage depend on many factors, many of which are variable, due to changes in the biological environment and variability of temperature, humidity, speed, outdoor air pressure and the like. Refrigeration and ventilation equipment that maintains the optimum temperature and humidity level in the refrigerator is considered. Attention is focused on the fact that during storage, it is necessary to take into account the features of each product and their compatibility during short-term and long-term storage; storage modes determined by temperature, relative humidity and air velocity must be constant and evenly distributed over the volume of the chamber. It is presented the graph of dependence of thermophysical indicators of vegetable raw materials on the example of squash on humidity (W), namely thermal conductivity (a), thermal conductivity (λ) and heat capacity (c). According to the results, it is interpreted that all constants in the range of humidity from 70 % to 80 % decrease, and after 80 % humidity the coefficients of heat capacity and thermal conductivity increase again, but the thermal conductivity continues to decrease linearly, indicating that with increasing humidity constants.*

Key words: *air conditioning, temperature and humidity conditions, heat and mass transfer processes, thermophysical indicators, refrigerated chamber, vegetable storage.*