

*Омельченко О. В., канд. техн. наук¹**Цвіркун Л. О., канд. пед. наук¹**Ларін О. О., здобувач ОС бакалавра¹*

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

МОДЕЛЮВАННЯ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ПЛОДОВООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ

*Omelchenko O. V., PhD in Engineering sciences¹**Tsvirkun L. A., PhD in Pedagogical sciences¹**Larin O. O., a graduate of a bachelor degree¹*

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

SIMULATION OF A REFRIGERATION INSTALLATION FOR FRUIT AND VEGETABLE RAW MATERIALS

Мета. Метою статті є моделювання холодильного обладнання для зберігання плодово-овочевої сировини.

Методи. У роботі для моделювання камери холодильного зберігання плодовоовочевої сировини з метою дослідження залежності між втратою маси та візуальною якістю овочів та фруктів застосовано математичні методи та методи нечіткої логіки.

Результати. Зазначено, що комплексний розвиток холодильної промисловості, розширення застосування штучного холоду, який забезпечує тривале збереження і зниження втрат харчової продукції є важливим завданням сьогодення. Тому останнім часом приділяється багато уваги інноваційним рішенням в області охолодження і тривалого зберігання фруктів та овочів, дозріванню бананів, заморозці продуктів в холодильних камерах. Вважається, що плодовоовочева сировина є дуже вразливою продукцією і необхідно чимало ноу-хау для того, щоб вона залишалася свіжою, соковитою, оптимально дозрілою зі збереженими вітамінами та поживними речовинами. Одним із шляхів обґрунтованого вибору тих чи інших рішень, пов'язаних із вирішенням зазначеної проблеми є моделювання перехідних режимів обладнання холодильної камери, повітроохолоджувачів холодильних установок, холодильного циклу тощо. Сконцентровано увагу на тому, що математичне моделювання невід'ємно пов'язане із САПР — системами автоматизованого проектування, АСУТП — автоматизованою системою управління технологічними процесами і АСУ — автоматизованою системою управління. Тому загальна задача моделювання як складної системи взаємопов'язаних елементів вимагає створення математичної моделі в якій будуть взаємопов'язані основні елементи цієї системи. Розглянуто узагальнену модель автоматичного керування режимами холодильної установки для зберігання плодовоовочевої сировини, яка містить у собі основні характеристики елементів холодильної установки, які дозволяють відтворювати відомі вхідні параметри (температура холодильної камери та охолоджуюче конденсаторне середовище, холодопродуктивність машини) за допомогою параметрів робочого циклу тощо. Представлено графік залежності втрати маси та візуальної якості фруктів та овочів, на прикладі полуниці, чорниці, спаржі та перцю задля здійснення вибіркового експериментування. Аналіз результатів показав, що загальна якість сировини погіршилася під час зберігання в міру збільшення втрати ваги; твердість зменшилася, що було найважливішим обмежуючим фактором якості для більшості фруктів та овочів; зміни в кольорі супроводжувалися змінами тканинної щільності; плоди мали темне забарвлення і перезрілий вигляд, кінчики спаржі розвинули потемніння приквітків.

Ключові слова: модель, моделювання, холодильна установка, холодильна камера, автоматичного керування, зберігання, компресор, конденсатор, випарник, плодовоовочева сировина.

Надійшла до редакції 29.10.2021 р. © О. В. Омельченко, Л. О. Цвіркун, О. О. Ларін, 2021

Постановка проблеми. Комплексний розвиток холодильної промисловості, розширення застосування штучного холоду, який забезпечує тривале збереження і зниження втрат харчової продукції є важливим завданням сьогодення. Автоматизовані холодильні машини забезпечують оптимальні температурно-вологісні режими в камерах охолодження та заморожування, що дозволяє зберегти продукти харчування з високою якістю. Проте це вимагає постійної модернізації як прогресивних технологічних процесів, що забезпечують інтенсифікацію холодильної обробки і оптимізацію режимів зберігання так і удосконалення проектування холодильної техніки, систем охолодження та управління [1, 2].

На свіжі продукти з повністю збереженими поживними речовинами та вітамінами пред'являється дуже високі вимоги до їх зберігання. Тому останнім часом приділяється багато уваги інноваційним рішенням в області охолодження і тривалого зберігання фруктів та овочів, дозрівання бананів, заморозки продуктів, будівництву холодильних камер й складів-холодильників. Плодовоовочева сировина є дуже вразливою продукцією і необхідно чимало ноу-хау для того, щоб вона залишалася свіжою, соковитою, оптимально дозрілою зі збереженими вітамінами та поживними речовинами. Одним із шляхів обґрунтованого вибору тих чи інших рішень, пов'язаних із вирішенням зазначеної проблеми є моделювання перехідних режимів обладнання холодильної камери, повітроохолоджувачів холодильних установок, холодильного циклу тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Математичне моделювання невід'ємно пов'язане із САПР — системами автоматизованого проектування, АСУТП — автоматизованою системою управління технологічними процесами і АСУ — автоматизованою системою управління. Тому загальна задача моделювання як складної системи взаємопов'язаних елементів вимагає створення математичної моделі в якій будуть взаємопов'язані основні елементи цієї системи [8], рис. 1.

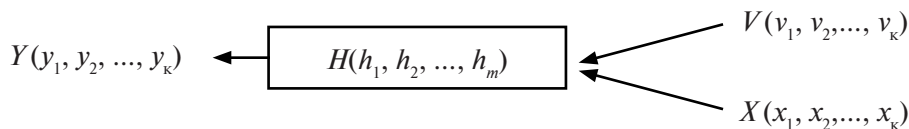


Рисунок 1 — Математична модель, де прямокутником позначено об'єкт (процес) моделювання;

$X(x_1, x_2, \dots, x_k)$ — безліч зовнішніх впливів на модельований об'єкт;

$V(v_1, v_2, \dots, v_k)$ — безліч впливів зовнішнього середовища;

$H(h_1, h_2, \dots, h_m)$ — безліч внутрішніх станів об'єкта;

$Y(y_1, y_2, \dots, y_k)$ — безліч вихідних параметрів модельованого об'єкту.

Якщо розглядати як об'єкт моделювання холодильну установку то вхідними параметрами для неї буде температури джерел тепла — навколишнього середовища і охолоджуємого об'єкта, а вхідним фактором — холодопродуктивність для здійснення технологічного процесу [3]. Загальна задача моделювання холодильної машини як складної системи взаємопов'язаних елементів вимагає створення математичної моделі в якій будуть взаємопов'язані зовнішні та внутрішні характеристики роботи холодильної установки. До основних зовнішніх характеристик відносяться параметри навколишнього середовища і теплопритоки в холодильній камері, до внутрішніх — геометричні та теплообмінні параметри апаратів, характеристики компресора і розширювального пристрою [4, 5, 6]. Відповідно, математична модель має містити у собі основні характеристики елементів холодильної установки, які дозволять відтворювати відомі вхідні параметри (температура холодильної камери та охолоджуюче конденсаторне середовище, холодопродуктивність машин) за допомогою параметрів робочого циклу тощо.

У математичній моделі використовуються рівняння, що описують робочі процеси в основних елементах холодильної машини. Так, узагальнена математична модель камери зберігання охолоджених продуктів представлена системою рівнянь балансів теплоти і маси [7].

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Q_{огор} = \sum_{i=1}^n m_{огор} \cdot c_{огор} \cdot \frac{d\theta_{огор}}{d\tau} \\ m_{np} \cdot c_{np} \frac{d\theta_{np}}{d\tau} = \sum_{i=1}^n Q_i \\ m_v \cdot c_{np} \frac{dt_v}{d\tau} = \sum_{j=1}^n Q_j \\ m_{ox} \cdot c_{ox} \frac{d\theta_{ox}}{d\tau} = \sum_{q=1}^n Q_q \\ dG - dm = \sum_i^n W_i \end{array} \right. \quad (1)$$

де $\theta_{огор}$, θ_{ox} — температура огороження та охолоджувальних приладів; Q_i , Q_j , Q_q — теплові потоки; W_i — вологопотоки; $c_{огор}$, c_{ox} — питома теплоємність.

Математична модель камери холодильного зберігання плодовоовочевої сировини представлена у вигляді системи диференціальних рівнів [1]

$$m_v \cdot c_p \frac{dt}{d\tau} = G_v \cdot c_p (t_1 - t_2) - \alpha_j \cdot f_j (\bar{t} - \theta_j) - \alpha_c \cdot f_c (\bar{t} - \theta_c) \quad (2)$$

$$m_j \cdot c_j \frac{d\theta_j}{d\tau} = \alpha_j \cdot f_j (\bar{t}_v - \theta_j) + q(\theta_j) \cdot m_j - \beta_i \cdot F_i \cdot r(a \cdot \theta_j + c - b \cdot d) \quad (3)$$

$$m_c \cdot c_c \frac{d\theta_c}{d\tau} = \alpha_c \cdot f_c (\bar{t} - \theta_c) - \alpha_n \cdot f_n (\theta_c - t_z) \quad (4)$$

$$m_{v0} \cdot \frac{dd}{d\tau} = \beta \cdot F_n (a - \theta_j) + c - b \cdot d - G_v \cdot (d_2 - d_1) \quad (5)$$

де β — коефіцієнт випаровування; F — поверхня опромінювання; d — вологовміст повітря; r — питома теплота пароутворення.

Мета статті — моделювання холодильного обладнання для зберігання плодовоовочевої сировини.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 2 показано принципову схему холодильного циклу, що складається з компресора, конденсатора, розширювального клапана та випарника. Компресор управляє холодоагентом через конденсатор, клапан розширення і випарник. Зниження тиску знижує температуру насичення холодоагенту, що дозволяє йому закипіти у випарнику, коли це поглинає тепло з відсіку холодильної машини.

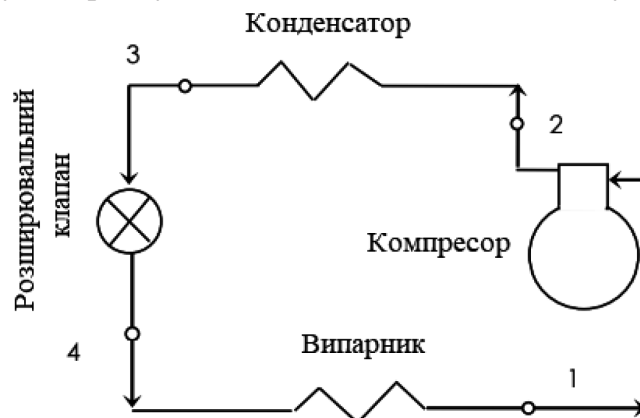


Рисунок 2 — Принципова схема холодильного циклу

Холодоагент повертається до компресора, щоб повторити цикл, а контролер включає й вимикає компресор, щоб забезпечити температуру відсіку холодильника в смузі навколо бажаної температури [9, 10].

Холодильний цикл зображено на діаграмі p - h , рис. 3. Перегріта пара надходить в компресор в стан 1 і стискається до стану 2. Зі стану 2 в стан 3, тепло відводиться від високотемпературного холодоагенту в навколишнє середовище, температура. Стиснутий рідкий холодоагент в стані 3 дроселює до тиску випарника в стан 4. У випарнику низькотемпературний холодоагент поглинає тепло з навколишнього середовища, що знаходиться при більш високій температурі.

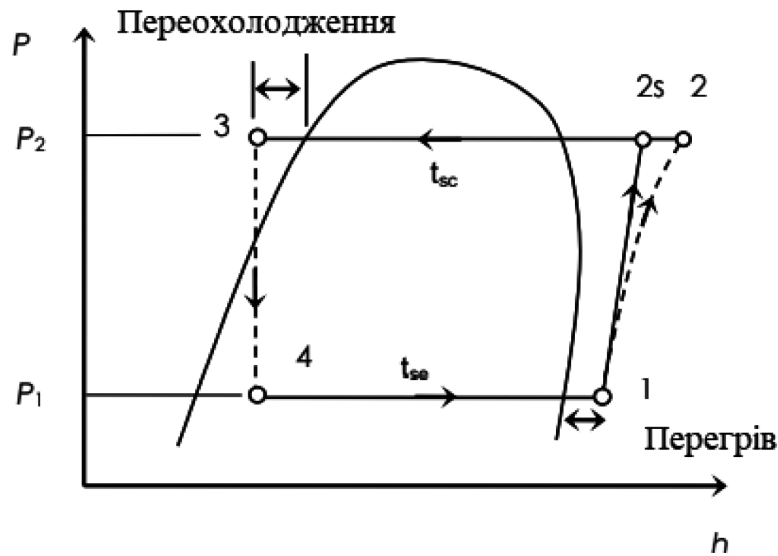


Рисунок 3 — Холодильний цикл на діаграмі p - h

Узагальнена модель [7, 11, 12] автоматичного керування холодильною установкою для зберігання плодовоовочевої сировини наведена на рис. 4.

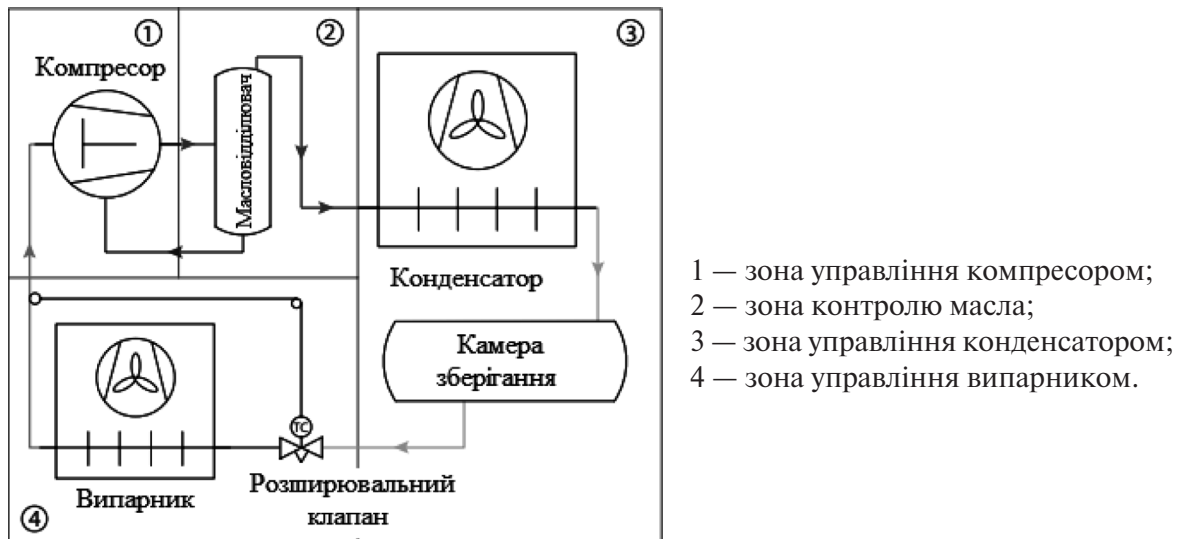


Рисунок 4 — Узагальнена модель автоматичного керування режимами холодильної установки для зберігання плодовоовочевої сировини

Незважаючи на дотримання вимог до зберігання плодовоовочевої сировини втрата ваги відбувається під час зберігання, особливо деяких видів сировини. Важливим для запобігання втрат маси плодовоовочевої сировини є автоматичне регулювання основних параметрів повітря в об'ємі камери та на виході з камери, а також дотримання відносної

вологості повітря. Графік залежності втрати маси та візуальної якості овочів і фруктів, що зберігаються при недотриманні відповідних показників (було розглянуто на прикладі полуниці, чорниці, спаржі та перцю, що дозволить здійснити вибіркове експериментування, рис. 5–6.

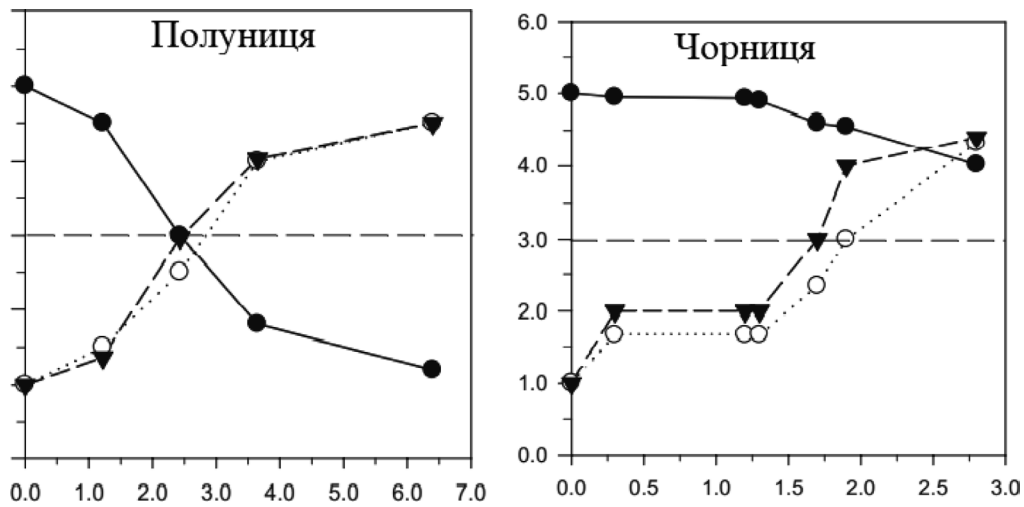


Рисунок 5 — Залежність втрати маси плодів та візуальної якості

----- — межа прийнятності до того, як якість фруктів стала неприйнятною;
 ● — стійкість;
 ○ — зморщування, в'янення, сушіння;
 ▼ — зміни кольору.

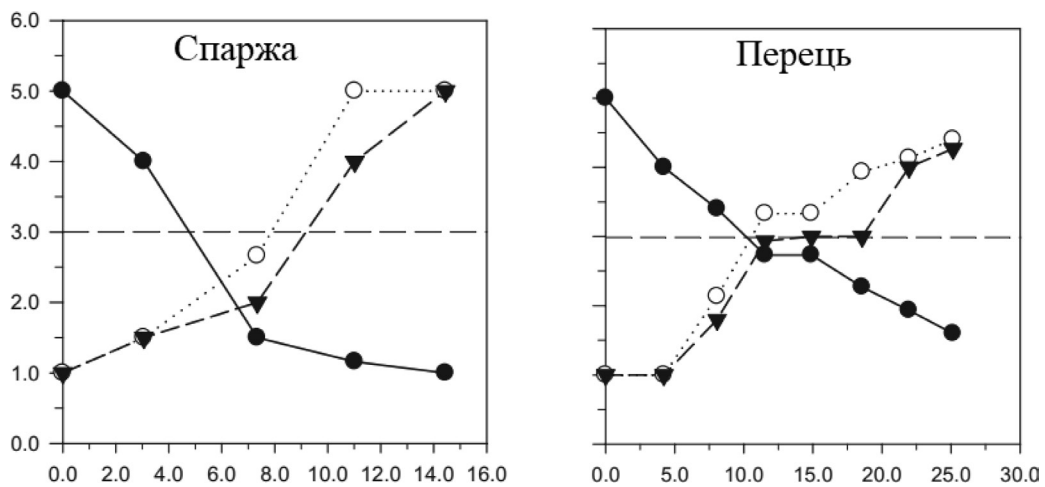


Рисунок 6 — Залежність втрати маси овочів та візуальної якості

----- — межа прийнятності до того, як якість фруктів стала неприйнятною;
 ● — стійкість;
 ○ — зморщування, в'янення, сушіння;
 ▼ — зміни кольору.

З графіків видно, що загальна якість фруктів та овочів погіршилася під час зберігання в міру збільшення втрати ваги; твердість зменшилася, що було найважливішим обмежуючим фактором якості для більшості фруктів та овочів; зміни в кольорі супроводжувалися змінами тканинної щільності; плоди мали темне забарвлення і перезрілий вигляд, кінчики спаржі розвинули потемніння приквітков. На таких рівнях втрати ваги, візуальна якість оцінених фруктів та овочів вже вважається неприйнятною через сильне пом'якшення, погіршення кольору, зморщування, в'янення або сухий вигляд.

Висновки. Отже, автоматизовані холодильні машини забезпечують оптимальні температурно-вологісні режими в камерах охолодження та заморожування, що дозволяє зберегти продукти харчування з високою якістю. Проте це вимагає постійної модернізації як

прогресивних технологічних процесів, що забезпечують інтенсифікацію холодильної обробки і оптимізацію режимів зберігання так і удосконалення проектування холодильної техніки, систем охолодження та управління.

Зазначено, що плодовоовочева сировина є дуже вразливою продукцією і необхідно чимало ноу-хау для того, щоб вона залишалася свіжою, соковитою, оптимально дозрілою зі збереженими вітамінами та поживними речовинами. Одним із шляхів обґрунтованого вибору тих чи інших рішень, пов'язаних із вирішенням зазначеної проблеми є моделювання перехідних режимів обладнання холодильної камери, повітроохолоджувачів холодильних установок, холодильного циклу тощо.

Розглянуто узагальнену модель автоматичного керування режимами холодильної установки для зберігання плодовоовочевої сировини, яка містить у собі основні характеристики елементів холодильної установки, які дозволяють відтворювати відомі вхідні параметри (температура холодильної камери та охолоджуюче конденсаторне середовище, холодопродуктивність машин) за допомогою параметрів робочого циклу тощо. Представлено графік залежності втрати маси та візуальної якості фруктів та овочів, на прикладі полуниці, персика, спаржі та перцю задля здійснення вибіркового експериментування. Інтерпретовано результати дослідження.

Список літератури

1. Котов Б. І., Грищенко В. О. Моделювання перехідних режимів обладнання холодильної камери та структури системи автоматичного керування (САК) температурно-вологісним режимом. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2010. Вип. 39. С. 62–67.
2. Стоянов П. Ф., Біленко Н. О., Стоянов Я. О. Моделювання роботи повітроохолоджувачів холодильних установок. *Холодильна техніка та технологія*. 2019. № 2. С. 25–30.
3. Huang B. J., Chen H. Y. Modeling of integral-type Stirling refrigerator using system dynamics approach. *International journal of refrigeration*. 2015. Vol. 23. P. 632–641.
4. Кишкин А. А., Лавров Н. А., Делков А. В., Мокеев В. В. Моделирование режимов работы малых холодильных установок. URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rezhimov-raboty-malyh-holodilnyh-ustanovok>.
5. Micallef D., Micallef C. Mathematical model of a vapour absorption refrigeration unit. *Refrigeration equipment and technology*. 2010. Vol. 9. P. 86–97.
6. Simulation model of a small power refrigeration cycle demonstration unit. Retrieved from https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/44846/Mart%C3%ADnez-Su%C3%A1rez_Simulation_2014.pdf?sequence=1.
7. Грищенко В. О. Автоматизація процесу керування холодильним обладнанням в плодовоовочесховищах: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.07. К., 2016. 212 с.
8. Бойко І. В., Петрик М. Р. Математичне моделювання в науково-технічних дослідженнях. Тернопіль: ТНТУ, 2017. 110 с.
9. Two-Phase Fluid Refrigeration — MATLAB & Simulink. Retrieved from <https://es.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/two-phase-fluid-refrigeration.htm>.
10. Senawi M. Y., Mahmod F. W. Simulation of a simple vapour-compression refrigeration system using R134a. *Mechanical engineering and machinery*. 2016. Vol. 6. P. 26–38.
11. Єрмілова Н. В., Кислиця С. Г., Тарасюк Р. М. Розроблення автоматизованої системи керування обладнанням овочесховища на базі нечітких нейронних мереж. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Вип. 1 (53). С. 50–54.
12. Automatic controls for industrial refrigeration systems. Retrieved from <https://web.fe.up.pt/~ee99259/projecto/conteudo%20teorico/artigos/Automatic%20Controls%20for%20Industrial%20Refrigeration%20Systems.pdf>.

References

1. Kotov, B. I., Grishchenko, V. O. (2010). *Modelyuvannya perekhidnykh rezhymiv obladnannya kholodilnoyi kamery ta struktury systemy avtomatychnoho keruvannya (SAK) temperaturno-*

volohisnym rezhymom [Modeling of transient modes of refrigeration chamber equipment and structure of automatic control system (ACS) by temperature-humidity mode]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya silskohospodarskykh mashyn* [Design, manufacture and operation of agricultural machinery], no. 39, pp. 62–67.

2. Stoyanov, P. F., Bilenko, N. O., Stoyanov, Ya. O. (2019). *Modelyuvannya roboty povitrookholodzhuvachiv kholodylnykh ustanovok* [Simulation of air coolers of refrigeration units]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiya* [Refrigeration equipment and technology], no. 2, pp. 25–30.

3. Huang B. J., Chen H. Y. Modeling of integral-type Stirling refrigerator using system dynamics approach. *International journal of refrigeration*. 2015. Vol. 23. P. 632–641.

4. Kishkin, A. A., Lavrov, N. A., Delkov, A. V., Mokeev, V. V. (2015). *Modelirovaniye rezhimov raboty malykh kholodil'nykh ustanovok* [Modeling the operating modes of small refrigeration units]. Available at : <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rezhimov-raboty-malyh-holodilnyh-ustanovok>.

5. Micallef D., Micallef C. Mathematical model of a vapour absorption refrigeration unit. *Refrigeration equipment and technology*. 2010. Vol. 9. P. 86–97.

6. Simulation model of a small power refrigeration cycle demonstration unit. Retrieved from https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/44846/Mart%C3%ADnez-Su%C3%A1rez_Simulation_2014.pdf?sequence=1.

7. Grishchenko, V. O. (2016). *Avtomatyizatsiya protsesu keruvannya kholodylnym obladnanniam v plodoovocheshkovyishchakh* [Automation of refrigeration equipment management process in fruit and vegetable storages]. Kyiv, 212 p.

8. Boyko, I. V., Petrik, M. R. (2017). *Matematychni modelyuvannya v nauково-tekhnichnykh doslidzhennyakh* [Mathematical modeling in scientific and technical research]. Ternopil, TNTU Publ., 110 p.

9. *Dvukhfaznoye zhidkoye okhlazhdeniye — MATLAB i Simulink* (2020). [Two-Phase Fluid Refrigeration — MATLAB & Simulink]. Available at : <https://es.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/two-phase-fluid-refrigeration.htm>.

10. Senawi, M. Y., Mahmood, F. W. Simulation of a simple vapour-compression refrigeration system using R134a. *Mechanical engineering and machinery*. 2016. Vol. 6. P. 26–38.

11. Ermilova, N. V., Kislytsia, S. G., Tarasyuk, R. M. (2019). *Rozroblennya avtomatyzovanoyi systemy keruvannya obladnanniam ovocheskovyishcha na bazi nechitkykh neyronnykh merezh* [Development of an automated control system for vegetable storage equipment based on fuzzy neural networks]. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zviazku* [Control, navigation and communication systems], no. 1(53), pp. 50–54.

12. Automatic controls for industrial refrigeration systems. Retrieved from <https://web.fe.up.pt/~ee99259/projecto/conteudo%20teorico/artigos/Automatic%20Controls%20for%20Industrial%20Refrigeration%20Systems.pdf>.

Objective. The purpose of the article is to model refrigeration equipment for storing fruit and vegetable raw materials.

Methods. In this work, mathematical methods and methods of fuzzy logic were used to simulate a refrigerated storage chamber for fruit and vegetable raw materials in order to study the relationship between weight loss and the visual quality of vegetables and fruits.

Results. It is noted that the integrated development of the refrigeration industry, the expansion of the use of artificial cold, which ensures long-term preservation and reduction of food losses, is an important task of our time. Therefore, in recent years, much attention has been paid to innovative solutions in the field of refrigeration and long-term storage of fruits and vegetables, ripening of bananas, freezing of products in refrigerated chambers. It is believed that raw fruit is a very vulnerable product and a lot of know-how is needed to keep it fresh, juicy, optimally ripe with preserved vitamins and nutrients. One of the ways to make a reasonable choice of certain solutions associated with solving this problem is to simulate transient modes of refrigerating chamber equipment, air coolers of refrigeration units, refrigeration cycle, and the like. Attention is focused on the fact that mathematical modeling is inextricably linked with CAD — computer-aided design systems, APCS — automated process control

system and ACS — automated control system. Therefore, the general task of modeling as a complex system of interconnected elements requires the creation of a mathematical model in which the main elements of this system will be interconnected. A generalized model of automatic control of the modes of a refrigeration unit for storing fruit and vegetable raw materials is considered, containing the main characteristics of the elements of the refrigeration unit, which will allow reproducing the known input parameters (temperature of the refrigerating chamber and cooling the condensing medium, refrigeration capacity of the machine) using the parameters of the operating cycle, and the like. A graph of the relationship between weight loss and visual quality of fruits and vegetables is presented, using the example of strawberries, blueberries, asparagus and peppers for selective experimentation. Analysis of the results showed that the overall quality of raw materials deteriorated during storage as weight loss increased; hardness decreased, which was the most important limiting quality factor for most fruits by which vegetables were judged; changes in color were accompanied by changes in tissue density; the fruit was dark in color and overripe, and the tips of the asparagus developed darkening of the bracts.

Key words: *model, modeling, refrigeration unit, cold room, automatic control, storage, compressor, condenser, evaporator, fruit-raw materials.*