

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ПОВІТРООХОЛОДЖУВАЧА ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЕРНА ЗА ЗБЕРІГАННЯ**

**В. О. ГРИЩЕНКО**, асистент  
*Національний університет біоресурсів  
і природокористування України*  
**Б. І. КОТОВ**, доктор технічних наук, професор  
*Вінницький національний аграрний університет*  
e-mail: *nni.elektrik@gmail.com*

**Анотація.** Представлені математичні моделі нестационарного тепло- і масообміну в повітроохолоджувачі парокомпресорного холодильного агрегату для охолодження зерна за зберігання. Проведено розрахунки зміни параметрів повітря в часі.

**Ключові слова:** *повітроохолоджувач, випарник, холодильний агент, повітря, витрати енергоносіїв*

В зв'язку із застосуванням високопродуктивних зернозбиральних комбайнів, прогресивних методів зберігання і доставки зерна до місця переробки і зберігання в період масового надходження свіжозібраного зерна значно скоротився. Це викликає додаткові труднощі, пов'язані із забезпеченням збереженості великої маси вологого зерна в короткі строки. Для попередження псування зерна підвищеної вологості застосовують вентилявання зернової маси в тимчасових і стаціонарних сховищах атмосферним і штучно охолодженим повітрям [1, 2]. Однак забезпечити охолодження зерна зовнішнім повітрям в період збирання врожаю не завжди [3] вдається за температури 18-26 °С. Тому, останнім часом для охолодження зерна за зберігання поширюється практика застосування штучного охолодження повітря холодильними машинами [4]. Технологія використання штучно охолодженого повітря для зниження самозігрівання зерна дозволяє загальмувати інтенсивність фізіолого-біохімічних, мікробіологічних процесів і активну життєдіяльність шкідників хлібних запасів. Для охолодження зерна застосовують стаціонарні і пересувні холодильні установки.

Як відомо [5] холодильні установки розраховують за стаціонарними параметрами вхідних потоків, але вони функціонують за змінних параметрів вхідних величин. Ефективне використання холодильних агрегатів може бути досягнуто шляхом автоматизації процесу керування, що зумовлює необхідність визначення динамічних властивостей холодильного обладнання, а саме інерційного об'єкта – повітроохолоджувача, парокомпресорного агрегату.

**Мета досліджень** – створення математичного опису динамічних властивостей повітроохолоджувача парокомпресорного агрегату і визначення перехідних процесів в об'єкті моделювання.

**Матеріали та методика досліджень.** Наявність значного різноманіття конструктивного виконання повітроохолоджувачів зумовлює аналітичні методи досліджень, які дозволяють характеризувати конструктивні особливості тільки величиною обмінних поверхонь, коефіцієнтами тепло- і масообміну (які визначаються гідравлічними умовами роботи) і витратами енергоносіїв.

В основу методики складання математичного опису покладено аналіз теплового і матеріального балансу, який записують у формі диференціальних рівнянь за загальноприйнятих для таких об'єктів спрощень [6]. Адекватність моделей визначається порівнянням отриманих теоретичних і експериментальних даних.

**Результати досліджень.** Повітроохолоджувач холодильної установки випарник – трубно-оребрена конструкція, де трубами рухається холодоагент в газорідній фазі, і в процесі переміщення повністю випаровується. Теплота, яка витрачається на доведення холодоагенту до кипіння і його випаровування відводиться від повітря, яке охолоджується. Тому, випарник можна представити як теплообмінник (двопотоківий), через який проходить холодоагент (фреон) і повітря. Розглядаючи його як об'єкт з трьома зосередженими ємностями, зміну температур холодоагенту і повітря на виході охолоджувача можна представити системою рівнянь теплового балансу:

$$m_a c_p \frac{dt_{a2}}{d\tau} = Q_{a1} - Q_{ox1} - Q_{a2}, \quad (1)$$

$$m_x c_x \frac{dt_{x2}}{d\tau} = Q_{x1} - Q_{ox2} - Q_{x2}, \quad (2)$$

$$m_{ox} c_{ox} \frac{d\theta_{x2}}{d\tau} = Q_{ox1} - Q_{ox2}, \quad (3)$$

де  $m_a, m_x, m_o$  – маса повітря, холодоагенту і матеріалу трубок і ребер, кг;

$c_p, c_x, c_{ox}$  – питома теплоємність повітря, холодоагента (середня) і матеріалу охолоджувача, Дж/(кг·°C);

$Q_{a1} = C_p G_a t_{a1}$  – кількість теплоти, що надходить до охолоджувача з повітрям в одиницю часу, Вт;

$Q_{a2}$  – кількість теплоти, що виноситься повітрям з охолоджувача за одиницю часу, Вт;

$Q_{ox1} = \alpha_b f_b (\bar{t}_a - \theta)$  – кількість теплоти, що передається трубками охолоджувача повітрям в одиницю часу, Вт;

$Q_{ox2} = \alpha_s f_s (\theta - \bar{t}_x)$  – кількість теплоти, що віднімається від трубок холодильним агентом в одиницю часу, Вт;

$Q_{x1} = G_x \bar{C}_x t_{x1}, Q_{x2} = G_x \bar{C}_x t_{x2}$  – ентальпія холодильного агента на вході і виході випарника, в одиницю часу, Дж;

$t_{a2}, t_{x2}$  – температура повітря на вході і виході охолоджувача;

$t_{x1}, t_{x2}$  – температура холодильного агента на вході і виході випарника, °С;

$\theta$  – температура металу повітря охолоджувача, °С;

$\bar{t}_a = 0,5(t_{a1} + t_{a2}), \bar{t}_x = 0,5(t_{x1} + t_{x2})$  -

Після підстановки в рівняння (1–3) складових теплового балансу матимемо, після відповідних перетворень:

$$m_a c_p \frac{dt_{a2}}{d\tau} = (G_a C_a - \alpha_b f_b 0.5)t_{a1} - (G_a C_a - \alpha_b f_b 0.5)t_{a2} + \alpha_b f_b \theta_{ox}, \quad (4)$$

$$m_x c_x \frac{dt_{x2}}{d\tau} = (G_x C_x - \alpha_x f_x 0.5)t_{x1} - (G_x C_x - \alpha_x f_x 0.5)t_{x2} + \alpha_x f_x \theta_{ox}, \quad (5)$$

$$m_{ox} c_{ox} \frac{d\theta}{d\tau} = \alpha_b f_b t_{a1} + \alpha_x f_x t_{x1} + \alpha_b f_b t_{a2} + \alpha_x f_x t_{x2} - (\alpha_x f_x + \alpha_b f_b) 2\theta. \quad (6)$$

За ізобарного охолодження повітря до температури зовнішньої поверхні випарника, яка нижча за температуру точки роси ( $t_v < \theta_o < t_p$ ) то відбувається часткова конденсація водяної пари, що знаходиться у вологому повітрі. Вологе повітря стає насиченим і на поверхні з температурою  $\theta_{ox} < t_p$  конденсується (наморожується) волога. Маса сконденсованої вологи визначається із співвідношення:

$$m_w = m_a (d''_{\pi}(\theta_{ox}) - d_a), \quad ()$$

де  $d''_{\pi}(\theta_{ox})$  – вологовміст насиченого повітря за температури поверхні;

$d_a$  – вологовміст повітря, що охолоджується, г/кг<sub>с.п.</sub>.

Кінетику масообміну за конденсації можна описати рівнянням:

$$\frac{dm_k}{d\tau} = \tau \cdot F_{ox} (d''_{\pi}(\theta_{ox}) - d), \quad (7)$$

де залежність вологовмісту насиченого повітря від температури можна апроксимувати лінійною функцією:

$$d''_{\pi}(\theta_{ox}) = a\theta_{ox} + c. \quad (8)$$

З урахуванням викладених посилань математичний опис процесу охолодження повітря необхідно доповнити рівнянням матеріального балансу для повітря в об'ємі охолоджувача:

$$m_a \frac{dd_2}{d\tau} = G_a (d_1 - d_2) + \tau \cdot f_6 (a\theta_{ox} + c - 0,5d_1 - 0,5d_2). \quad (9)$$

Подання математичного опису передатними функціями. Система рівнянь (4–6) та (9) нелінійна, оскільки рівняння містять добутки змінних параметрів.

Для лінеаризації нелінійних рівнянь запишемо змінні параметри у приростах до їх значень у стаціонарному режимі

$$T_1 \frac{d\Delta t_2}{d\tau} + \Delta t_2 = k_1 \Delta t_1 + k_2 \Delta G_a + k_3 \Delta \theta_{ox}, \quad (10)$$

$$T_2 \frac{d\Delta t_{x2}}{d\tau} + \Delta t_{x2} = k_4 \Delta Q_0 + k_5 \Delta G_x + k_6 \Delta \theta_{ox}, \quad (11)$$

$$T_3 \frac{d\Delta \theta_{ox}}{d\tau} + \Delta \theta_{ox} = k_7 \Delta t_1 + k_8 \Delta t_2 + k_9 \Delta t_{x2} + k_{10} \Delta Q_0, \quad (12)$$

$$T_4 \frac{d\Delta d_2}{d\tau} + \Delta d_2 = k_{11} \Delta d_1 + k_{12} \Delta \theta_{ox}, \quad (13)$$

$$\text{де } T_1 = \frac{m_a c_a}{k_{01}}; k_{01} = G_a C_a + 0.5 \alpha_b f_b; k_1 = \frac{G_a C_a - 0.5 \alpha_b f_b}{k_{01}};$$

$$k_2 = \frac{C_a (t_{a1} - t_{a2})}{k_{01}}; k_3 = \frac{\alpha_b f_b}{k_{01}}; T_2 = \frac{m_x c_x}{k_{02}}; k_{02} = G_x C_x + 0.5 \alpha_x f_x;$$

$$k_4 = \frac{G_x C_x + 0.5 \alpha_x f_x}{a_1 \cdot k_{02}}; k_5 = \frac{C_x (t_{x1} - t_{x2})}{k_{02}}; T_3 = \frac{m'_{ox} c'_{ox}}{k_{03}}; k_{03} = \alpha_b f_b + \alpha_x f_x; k_7 = \frac{0.5 \alpha_b f_b}{k_{03}}; k_8 = k_7; k_9 = \frac{0.5 \alpha_x f_x}{k_{03}}; k_{10} = \frac{0.5 \alpha_x f_x}{a_1 \cdot k_{03}}; k_6 = \frac{\alpha_x f_x}{k_{03}}; T_4 = \frac{m_a}{k_{04}};$$

$$k_{04} = G_a + 0.5 \tau f_b; k_{11} = (G_a + 0.5 \tau f_b) / k_{04}; k_{12} = \frac{\tau f_b a}{k_{04}}.$$

Застосовуючи до рівнянь (10–13) перетворення Лапласа за нульових початкових умов отримуємо систему рівнянь в операторній формі:

$$(T_1 p + 1) \Delta t_2(P) = k_1 \Delta t_1(P) + k_2 \Delta G_a(P) + k_3 \Delta \theta_{ox}(P), \quad (14)$$

$$(T_2 p + 1) \Delta t_{x2}(P) = k_4 \Delta Q_0(P) + k_5 \Delta G_x(P) + k_6 \Delta \theta_{ox}(P), \quad (15)$$

$$(T_3 p + 1) \Delta \theta_0(P) = k_7 \Delta t_1(P) + k_8 \Delta t_2(P) + k_9 \Delta t_{x2}(P) + k_{10} \Delta Q_0(P), \quad (16)$$

$$(T_4 p + 1) \Delta d_2(P) = k_{11} \Delta d_1(P) + k_{12} \Delta \theta_{ox}(P). \quad (17)$$

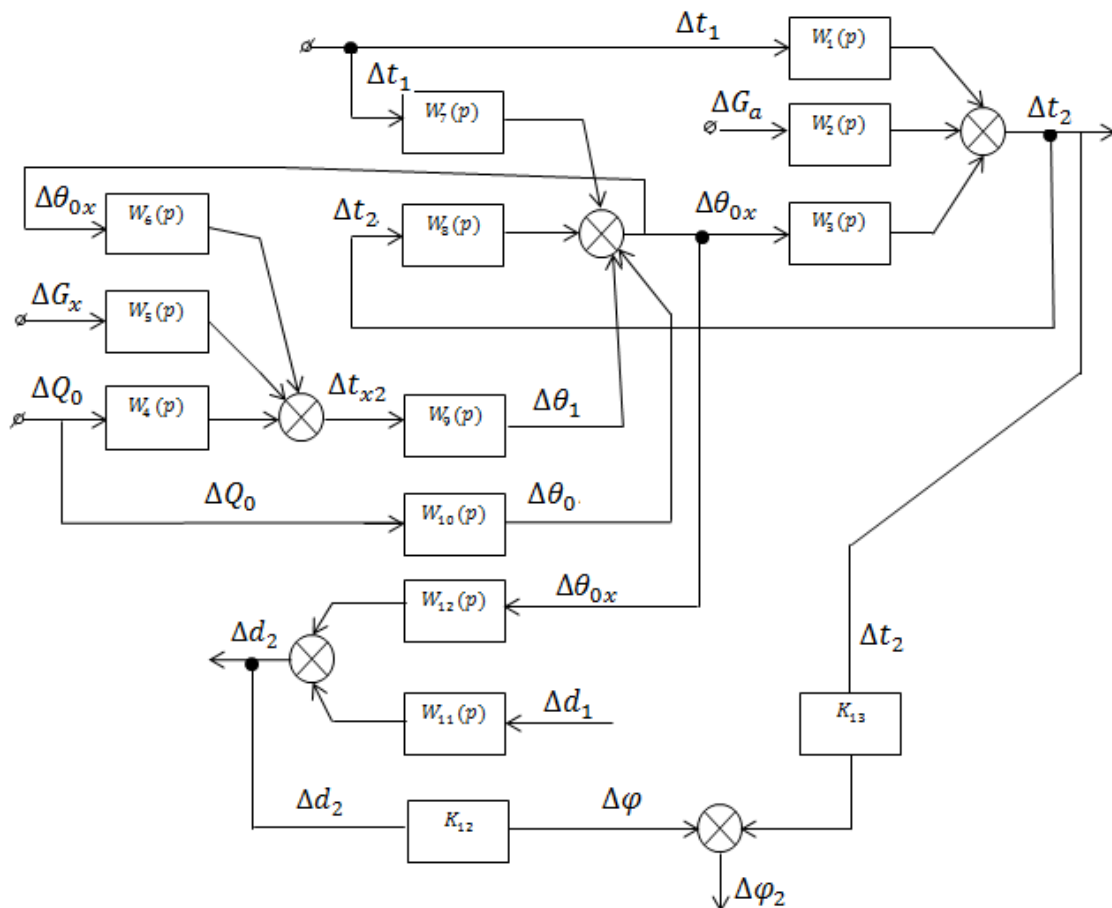
Розв'язок системи рівнянь отримаємо у вигляді передавальних функцій для регулюючих параметрів відносно регулюючих впливів і збурень (рис. 1):

$$W_1(P) = \frac{\Delta t_2(P)}{\Delta t_1(P)} = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; W_2(P) = \frac{\Delta t_2(P)}{\Delta G(P)} = \frac{k_2}{T_1 p + 1}; W_3(P) = \frac{\Delta t_2(P)}{\Delta \theta_{ox}(P)} = \frac{k_3}{T_1 p + 1};$$

$$W_4(P) = \frac{\Delta t_{x2}(P)}{\Delta Q_0(P)} = \frac{k_4}{T_2 p + 1}; W_5(P) = \frac{\Delta t_{x2}(P)}{\Delta G_x(P)} = \frac{k_5}{T_2 p + 1}; W_6(P) = \frac{\Delta t_{x2}(P)}{\Delta \theta_{ox}(P)} = \frac{k_6}{T_2 p + 1};$$

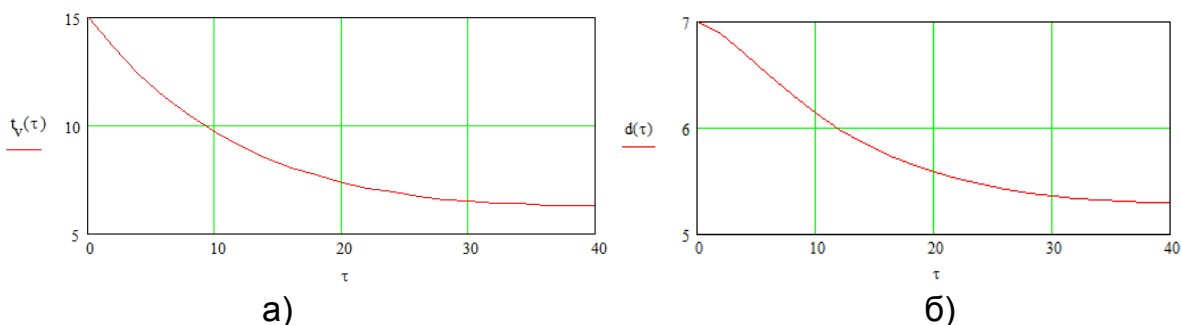
$$W_7(P) = \frac{\Delta \theta_{ox}(P)}{\Delta t_1(P)} = \frac{k_7}{T_3 p + 1}; W_8(P) = \frac{\Delta \theta_{ox}(P)}{\Delta t_2(P)} = \frac{k_8}{T_3 p + 1}; W_9(P) = \frac{\Delta \theta_{ox}(P)}{\Delta t_{x2}(P)} = \frac{k_9}{T_3 p + 1};$$

$$W_{10}(P) = \frac{\Delta \theta_{ox}(P)}{\Delta Q_0(P)} = \frac{k_{10}}{T_4 p + 1}; W_{11}(P) = \frac{\Delta d_2(P)}{\Delta d_1(P)} = \frac{k_{11}}{T_{11} p + 1}; W_{12}(P) = \frac{\Delta d_2(P)}{\Delta \theta_{ox}(P)} = \frac{k_{12}}{T_4 p + 1}.$$



**Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі динаміки повітроохолоджувача**

На рис. 2. наведено перехідний процес зміна температури (а) і вологовмісту повітря (б) в часі.



**Рис. 2. Перехідний процес повітроохолоджувача:**  
а) температура повітря; б) вологовміст повітря

### Висновки

1. Розроблені математичні моделі динамічних режимів у вигляді системи диференціальних рівнянь можна використати для розрахунків на ЕОМ оптимальних параметрів повітроохолоджувача.

2. Математичну модель, реалізовану лінійними передавальними функціями, використовують для синтезу системи автоматичного керування.

3. В результаті моделювання визначено можливість керування холодильним агрегатом шляхом зміни витрат повітря або холодоагенту.

### Список літератури

1. Мельник Б. Е. Производство зернового сырья на элеваторах: учебник для сред. спец. учеб. заведений / Б. Е. Мельник, В. Б. Лебедев, Н. И. Малин; под ред. Б. Е. Мельника. – М.: Колос, 1996. – 496 с.
2. Вобликов Е. М. Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов, В. А. Буханцов, Б. К. Маратов, А. С. Прокопец. – Ростов н/Д.: МарТ, 2001. – 231 с.
3. Вобликов Е. М. Технология хранения зерна/ Е. М. Вобликов. – С.-Пб.: Лань, 2003. – 448 с.
4. Станкевич Г. Н. Техника и технология использования искусственно охлажденного воздуха в процессе хранения зерна / Г. Н. Станкевич, Б. Н. Петруня // Хранение и переработка зерна. – 2003. – № 3. – С.52–53.
5. Поплевин О. П. Обоснование параметров холодильной машины для временной консервации влажных семян зерновых культур. автореф. дисс... канд. техн. наук: спец. «» /Поплевин В. Ю.; ВИМ. - М., – 1984. – 18 с.
6. Грищенко В. О. Автоматизація керування системою створення мікроклімату в камері плодовоовочесховищ./ В. О. Грищенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – К., 2014. – Вип. 194. –Ч.2. – 249. –С.206–209.

### References

1. Melnik, B. E., Lebedev, V. B., Malin, N. I. (1996) Proizvodstvo zernovogo syria na elevatorakh [Manufacture of grain raw materials on elevators]. – Moscow, Russia: Kolos, 496.
2. Voblikov, E. M., Bukhantsov, V. A., Maratov, B. K., Prokopets, A. S. (2001) Posleuborochnay obrabotka i khraneniye zerna [Machining and storage of grain after cleaning]. Rostov-na-Donu, Russia: MarT, 231.
3. Voblikov, E. M. (2003) Tekhnologiya khraneniya zerna [Production engineering of storage of grain]. Lan, 448.
4. Stankevich, G. N., Petrunya, B. N. (2003) Tekhnika i tekhnologiya ispolzovaniya iskusstvenno okhlazhdenного vozdukha v protsesse khraneniya zerna [Technics and use production engineering it is artificial chilledair in the course of grainstorage]. Storage and grainrehash, 3, 52–53.
5. Poplevin, O. P. (1984) Obosnovaniye parametrov k holodilnoy mashiny dlya vremennoy konservatsii vlazhnykh semyan zernovykh kultur [Parametres Substantiation of the refrigerating machine for time rust-preventivetreatment of grain crops wetseeds]. All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization of the Russian Agricultural Sciences Academy. Moscow,. 18.
6. Ghryshhenko, V. O. (2014) Avtomatyziacij akeruvannja system ojustvorennja mikroklimatu v kameri plodoovocheshkovyshh [Automation control system create the microclimate in the storagechamber fruit and vegetables]. Scientific Bullet in of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. A series of "Technology and Energy AIC", 194, 2, 249, 206–209.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЗЕРНА ПРИ ХРАНЕНИИ

**В. А. Грищенко,  
Б. И. Котов**

**Аннотация.** Представлены математические модели нестационарного тепло- и массообмена в воздухоохладителях парокompрессорных холодильных агрегатов для охлаждения зерна при хранении. Проведены расчеты изменения параметров воздуха во времени.

**Ключевые слова:** воздухоохладитель, испаритель, хладагент, воздух, расход энергоносителей

## MATHEMATICAL MODELING AND CALCULATION OF AIR COOLERS DYNAMIC MODE COOLING GRAIN STORAGE

**V. Gryschenko,  
B. Kotov**

**Annotation.** Mathematical models of non-stationary heat and mass transfer in the air cooler vapor compression refrigeration units to cool the grain in storage. The calculations of changes in air parameters in time.

**Keywords:** air cooler, evaporator, refrigerant, air, energy costs

УДК 536(0758)

## АНАЛИЗ ФАЗОПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ

**Б. Х. ДРАГАНОВ**, доктор технических наук, профессор  
Национальный университет биоресурсов  
и природоиспользования Украины

**В. Г. ДЕМЧЕНКО**, кандидат технических наук  
Институт технической теплофизики НАН Украины

**Аннотация.** Приведён анализ фазовых переходов на основе положений Гиббса. Изложена теория поверхностных процессов адсорбций. Даны основные сведения о принципах метода линейных феноменологических соотношений, основанных на положениях неравновесной термодинамики. Исследуется процесс тепломассообмена многокомпонентных сред. Исследованы условия производства энтропии в анализируемых процессах.

**Ключевые слова:** фазовый переход; потенциал Гиббса; адсорбция; соотношение Онсагера; феноменологическая зависимость; поток; термодинамическая сила; коэффициенты взаимности; энтропия; производство энтропии

Исследование процессов тепломассообмена в многокомпонентных средах является актуальной научной задачей. Существенный вклад в теорию фазовых переходов внёс У. Гиббс, который предложил соотношение, выполняемое в любой гомогенной части системы.