

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ НАСИПУ ЗЕРНА ЯК ОБ'ЄКТА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В. О. ГРИЩЕНКО, кандидат технічних наук,

О. Д. КУРГАНСЬКИЙ, аспірант*

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Б. І. КОТОВ, доктор технічних наук, професор
Вінницький національний аграрний університет

E-mail: bereck2001@rambler.ru

Анотація. В статті дано аналіз останніх досліджень щодо застосування технології охолодження зернового матеріалу безпосередньо в сховищах шляхом вентиляції насипу холодним повітрям. Для визначення динамічних характеристик об'єкта моделювання використано аналітично-розрахунковий метод, сутність якого полягає в наступному: на основі апріорної інформації про фізичну картину явищ, що відбуваються за взаємодії шару зерна із джерелом тепловиділень (біохімічного характеру) з охолоджуючим повітрям складаються рівняння теплового балансу в диференціальній формі з частинними похідними, які визначають градієнти параметрів повітря за висотою. Процеси тепло- і масообміну за охолодження зернових матеріалів шляхом відведення теплоти від матеріалу конвективним способом за фільтрації повітря описано типовими рівняннями теплового і матеріального балансу у вигляді замкненої системи.

Отримано математичну модель динамічних режимів охолодження вологого зерна в нерухомому шарі за активного вентиляції, яку можна розв'язати в середовищах MathCAD (MATLAB) за незмінних витрат повітря. Шляхом лінеаризації нелінійних рівнянь і застосовуючи до них перетворення Лапласа за нульових початкових умов, отримано систему диференціальних рівнянь в операторній формі. Отримано структурну схему лінійної математичної моделі, яка може бути використана для синтезу і аналізу САК процесом охолодження зерна в сховищі.

Ключові слова: *математична модель, передатна функція, насип зерна, охоложене повітря*

Актуальність. Післязбиральна обробка зерна є обов'язковою умовою збереження зібраного врожаю в сховищах і є енергоємним процесом, який потребує вдосконалення та пошуку перспективних напрямів сушіння зерна.

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Б. І. Котов

© В. О. Грищенко, О. Д. Курганський, Б. І. Котов, 2017

Нині актуальною є проблема підвищення стійкості до зберігання свіжозібраного урожаю зернових культур за місцем їх виробництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження [1, 2] виявили перспективним застосування технології охолодження зернового матеріалу безпосередньо в сховищах шляхом вентилявання насипу холодним повітрям. При цьому застосовують машинне (паро-компресорні холодильні установки) охолодження повітря [3]. Зважаючи на значні об'єми зерна, що зберігаються в господарствах і відповідні потужності холодильних установок оптимальні режими періодичного охолодження [1] можна реалізувати тільки засобами автоматичного керування. Для синтезу САК температурними режимами охолодження необхідно мати динамічні характеристики об'єкту, бажано у вигляді передавальних функцій [4] за відповідними каналами, оскільки вентиляється насип зернового матеріалу досить високого шару, виникає необхідність врахування розподіленості параметрів об'єкту за координатою за напрямком руху фільтрованого повітря.

Існуючі математичні моделі описують [5] динаміку теплових процесів складними трансцендентними функціями, використання яких ускладнює синтез САК і її подальший аналіз.

Мета досліджень – визначення динамічних характеристик процесу вентилявання насипу зерна в сховищах на основі лінеаризованих рівнянь теплових процесів і відповідних передатних функцій.

Матеріали і методи дослідження. Для визначення динамічних характеристик об'єкта моделювання використано аналітично-розрахунковий метод, сутність якого полягає в наступному: на основі апріорної інформації про фізичну картину явищ, що відбуваються за взаємодії шару зерна із джерелом тепловиділень (біохімічного характеру) з охолоджуючим повітрям складаються рівняння теплового балансу в диференціальній формі з частинними похідними, які визначають градієнти параметрів повітря за висотою. Розв'язком системи рівнянь для сталого режиму визначається розподіл шуканих параметрів за висотою насипу і значення градієнтів у функції координат [6]. При цьому рівняння з частинними похідними замінюють звичайними диференціальними рівняннями, лінеаризація яких здійснюється звичайними методами [6].

Результати дослідження та їх обговорення. Процеси тепло- і масообміну за охолодження зернових матеріалів шляхом відведення теплоти від матеріалу конвективним способом за фільтрації повітря можна описати типовими рівняннями теплового і матеріального балансу у вигляді замкненої системи [7]:

$$m_z q_z + m_v c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_v c_p H \frac{\partial t}{\partial x} = m_z c_z \frac{\partial \theta_z}{\partial \tau} + r_0 m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$-m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} = m_v \frac{\partial d}{\partial \tau} + G_v H \frac{\partial d}{\partial x}, \quad (2)$$

$$m_v c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_v c_p H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha f (\theta - t), \quad (3)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} = k(U - bd) \quad (4)$$

де t, d – температура та вологовміст повітря;

θ, U – температура і вологовміст матеріалу;

m_v, m_z, m_0 – маса повітря, зерна і абсолютно сухого матеріалу в об'ємі шару;

c_p, c_z – питома теплоємність повітря і зерна;

G_v – витрати повітря;

H, f – висота насипу і поверхня зерна;

α, r_0 – коефіцієнт теплообміну і питома теплота пароутворення;

k – коефіцієнт сушіння.

З використанням (3) для сталого режиму отримаємо

$$t = \theta_m + (\theta_1 - \theta_m) e^{-\frac{x}{T_x}} \quad (5)$$

де $T_x = G_v c_p H / \alpha f$.

Порівнюючи рівняння (2) і (4) з використанням рівняння матеріального балансу

$$m_0(U_0 - U) = m_v(d - d_0) \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

після диференціювання за умов: $x = 0, d = d_1$, матимемо:

$$d = D - (D - d_1) e^{-\frac{x}{T_{xd}}} \quad (7)$$

де $D = \frac{D_1}{D_2 + b}$; $T_{xd} = \frac{G_v H}{m_0 k (D_2 + b)}$; $D_1 = U_0 - \frac{m_v}{m_0} d_0$; $D_2 = \frac{m_0}{m_z}$.

Диференціюючи рівняння (5) і (7) і підставляючи отримані значення в рівняння (1) – (3) та використовуючи заміну: $\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{r_0}{c} Rb \frac{dU}{d\tau}$ (де Rb – критерій Ребіндера) після перетворень отримаємо систему рівнянь у звичайних похідних:

$$T_1 \frac{dt}{d\tau} + t = k_0 x \theta_1 - m_1 G_v + \theta_m k x \theta_1 - m_1 G_v \quad (8)$$

$$T_2 \frac{dd}{d\tau} + d = D - (D - d_1) e^{-\frac{x}{T_{xd}}} - k_0 n_1 x - k_0 m_1 x G_v \quad (9)$$

$$T_3 \frac{d\theta}{d\tau} + \theta = t + \frac{m_0 q}{\alpha f} U_0 + d + \frac{m_0 (k_0 k + q)}{\alpha f} U - \frac{r_0 m_0 k b}{\alpha f} d \quad (10)$$

$$T_4 \frac{dU}{d\tau} + U = t + \frac{\alpha f}{m_0 (k_0 k + q)} t - \frac{\alpha f}{m_0 (k_0 k + q)} \theta + \frac{r_0 k b}{r_0 k + q} d + \frac{q U_0}{r_0 k + q} \quad (11)$$

де $T_1 = \frac{m_v c_p}{\alpha f}$; $k_0 = \frac{m_0 k (D_2 + b)}{H}$; $T_2 =$; $T_3 = \frac{m_0 + c_z}{\alpha f}$; $T_4 = \frac{r_0 Rb}{r_0 k + q}$;

m_1, n_1 – коефіцієнти лінеаризації.

Таким чином система рівнянь (8) – (11) являє собою математичну модель динамічних режимів охолодження вологого зерна в нерухомому шарі за активного вентилявання, яку можна розв'язати в середовищах MathCAD (MATLAB) за незмінних витрат повітря.

Лінеаризуючи нелінійні рівняння (8) – (11) шляхом змінних параметрів процесу у вигляді суми сталого значення параметра і його приросту: $X = X_0 + \Delta X$ за звичайною методикою [4, 5] і застосовуючи до них перетворення Лапласа за нульових початкових умов, отримуємо систему диференціальних рівнянь в операторній формі:

$$\mathfrak{T}_1 p + 1 \Delta t \bar{\mathfrak{p}} = k_1 \Delta t_1 \bar{\mathfrak{p}} + k_2 \Delta G_v \bar{\mathfrak{p}} + k_3 \Delta \theta_m \bar{\mathfrak{p}}, \quad (12)$$

$$\mathfrak{T}_2 p + 1 \Delta d \bar{\mathfrak{p}} = k_4 \Delta G_v \bar{\mathfrak{p}} + k_5 \Delta d_1 \bar{\mathfrak{p}}, \quad (13)$$

$$\mathfrak{T}_3 p + 1 \Delta \theta \bar{\mathfrak{p}} = k_6 \Delta t \bar{\mathfrak{p}} + k_7 \Delta U_1 \bar{\mathfrak{p}} + k_8 \Delta U \bar{\mathfrak{p}} + k_9 \Delta d \bar{\mathfrak{p}} + k_{10} \Delta q \bar{\mathfrak{p}}, \quad (14)$$

$$\mathfrak{T}_4 p + 1 \Delta U \bar{\mathfrak{p}} = k_{11} \Delta t \bar{\mathfrak{p}} + k_{12} \Delta \theta \bar{\mathfrak{p}} + k_{13} \Delta d \bar{\mathfrak{p}} + k_{14} \Delta U_1 \bar{\mathfrak{p}} + k_{15} \Delta q \bar{\mathfrak{p}}, \quad (15)$$

де $k_1 = 1 + m_1 G_v - n_1 \bar{k}_0 X$; $k_2 = n_1 t_1 - m_1 \theta_m \bar{k}_0 X$;
 $k_3 = n_1 - G_v m_1 \bar{k}_0 X$; $k_4 = D m_1 + k_0 m_1 d_1 \bar{k}_0 X$; $k_5 = 1 - n_1 - m_1 G_v \bar{k}_0 X$; $k_6 = 1$;
 $k_7 = \frac{m_0 q}{\alpha f}$; $k_8 = \frac{m_0}{\alpha f} (k_0 k - q)$; $k_9 = -\frac{r_0 m_0 k b}{\alpha f}$; $k_{10} = \frac{m_0 (U_1 - U)}{\alpha f}$; $k_{11} = \frac{\alpha f}{m_0 (r_0 + q)}$;
 $k_{12} = k_{11}$; $k_{13} = \frac{r_0 k b}{r_0 k + q}$; $k_{14} = \frac{q}{r_0 k + q}$; $k_{15} = \frac{U_{10}}{r_0 k + q}$.

З рівнянь (12) – (15) визначимо передавальні функції окремих ланок за каналами регулювання ($\Delta G \rightarrow \Delta U, \Delta t \rightarrow \Delta U$) і збурення $\Delta t_1 \rightarrow \Delta U$, $\Delta d_1 \rightarrow \Delta U$:

$$W_1 \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta t \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta t_1 \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; \quad W_2 \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta t \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta G_v \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_2}{T_1 p + 1}; \quad W_3 \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta t \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta \theta_m \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_3}{T_1 p + 1};$$

$$W_4 \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta d \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta G_v \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_4}{T_2 p + 1}; \quad W_5 \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta d \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta d_1 \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_5}{T_2 p + 1}; \quad W_6 \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta \theta \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta t \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_6}{T_3 p + 1};$$

;

$$W_7 \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta \theta \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta U_1 \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_7}{T_3 p + 1}; \quad W_8 \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta \theta \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta U_1 \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_8}{T_3 p + 1}; \quad W_9 \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta \theta \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta d \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_9}{T_3 p + 1};$$

;

$$W_{10} \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta \theta \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta q \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_{10}}{T_3 p + 1}; \quad ; \quad W_{11} \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta U \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta d \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_{11}}{T_4 p + 1}; \quad ;$$

$$W_{12} \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta t \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta \theta \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_{12}}{T_4 p + 1};$$

$$W_{13} \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta U \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta d \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_{13}}{T_4 p + 1}; \quad ; \quad W_{14} \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta U \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta U_1 \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_{14}}{T_4 p + 1}; \quad ;$$

$$W_{15} \bar{\mathfrak{p}} = \frac{\Delta U \bar{\mathfrak{p}}}{\Delta q \bar{\mathfrak{p}}} = \frac{k_{15}}{T_4 p + 1}.$$

Використовуючи систему рівнянь (12) – (15) і отримані передатні функції складемо структурну схему лінійної математичної моделі динаміки теплообмінних і масо-обмінних процесів за сушіння зерна в нерухомому шарі активним вентиляванням атмосферним або підігрітим повітрям (рис.1).

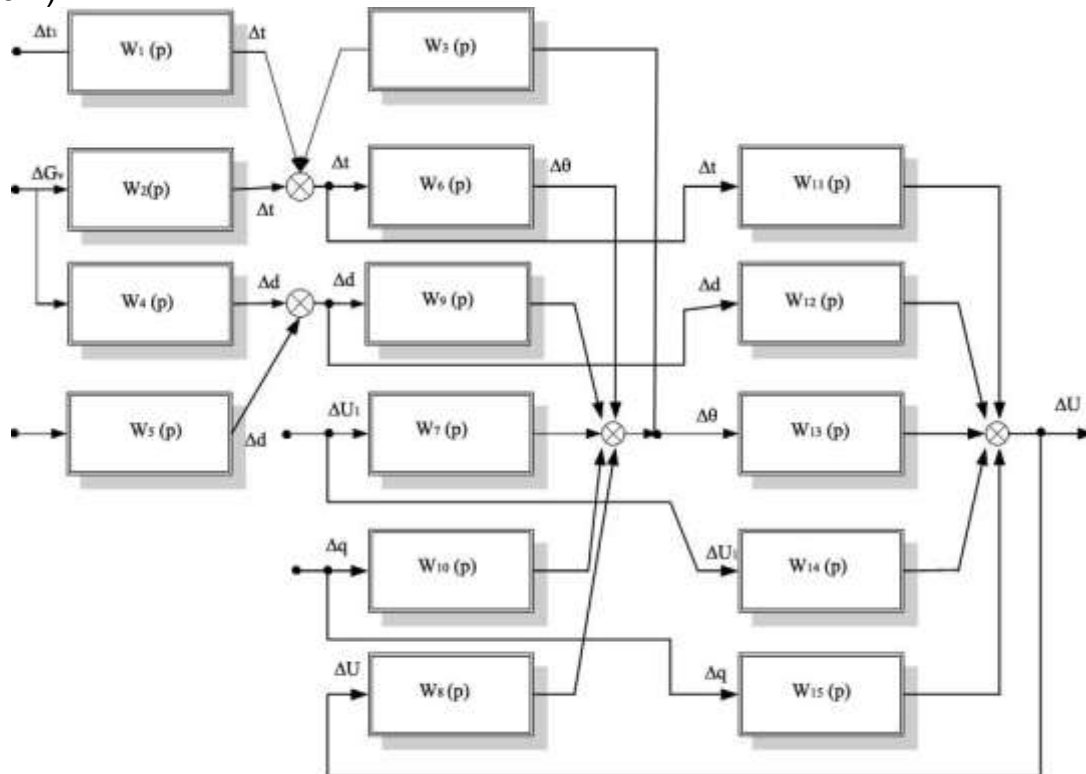


Рис. 1. Структурна схема лінійної математичної моделі процесу сушіння зерна активним вентиляванням

Висновки і перспективи. Моделювання процесу охолодження зерна дозволяє за наближеними формулами відтворити процес зміни температури і вологості зерна в часі і за висотою шару.

Отримана структурна схема лінійної математичної моделі може бути використана для синтезу і аналізу САК процесом охолодження зерна в сховищі.

Список використаних джерел

1. Станкевич, Г. Н. Консервация зерновой массы с использованием искусственно охлажденного воздуха / Г. Н. Станкевич, Б. Н. Петруня, И. И. Бичинюк, Ю. В. Лищенко // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. – 2001. – 21. – С. 39–41.
2. Петруня, Б. Н. Перспективы использования холодильных систем для хранения зерна / Б. Н. Петруня, А. С. Титлов, С. Н. Кудашев // Хранение и переработка зерна. – 2002. – 12. – С. 33–34.
3. Грищенко, В. О. Математичне моделювання і розрахунок динамічних режимів повітроохолоджувача для охолодження зерна за зберігання / В. О. Грищенко, Б. І. Котов // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2016. – Вип. 252. – С. 108–114.

4. 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. – 2014. – Вип. 194(2). – С. 206–210.

5. Мартыненко, И. И. Автоматическое управление температурно-влажностными режимами сельскохозяйственных объектов [Текст] / И. И. Мартыненко, Н. Л. Гирнык. – М.: Колос, 1984 – 152 с.

6. Котов, Б. І. Врахування розподіленості параметрів при моделюванні динамічних сушарок сільськогосподарських матеріалів / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, В. О. Швидя // Сільськогосподарські машини. – 2016. – Вип. 34. – С. 74–80.

7. Котов, Б. І. Аналітичне дослідження тепломасопереносу в товстому шарі матеріалу при двостадійному процесі сушіння зерна / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2011. – Вип. 166(4). – С. 138–147.

References

1. Stankevich, G. N., Petrunja, B. N., Bichinjuk, I. I., Lishhenko, Ju. V. (2001). Konservacija zernovoj massy s ispol'zovaniem iskusstvenno ohlazhdennogo vozduha [Conservation of grain mass using artificially cooled air]. Scientific works of the Odessa State Academy of Food Technology, 21, 39–41.

2. Petrunja, B. N., Titlov, A. S., Kudashev, S. N. (2002). Perspektivy ispol'zovanija holodil'nyh sistem dlja hranenija zerna [Prospects for using refrigeration systems for grain storage]. Grain storage and processing, 12, 33–34.

3. Hryshchenko, V. O., Kotov, B. I. (2016) Matematychnе modeliuвання i rozrakhunok dynamichnykh rezhymiv povitrookholodzhuvacha dlja okholodzhennia zerna za zberihannia [Mathematical modeling and calculation of dynamic modes of an air cooler for cooling grain storage]. Scientific Journal NUBiP Ukraine. Series: Engineering and Energy AIC, 252, 108–114.

4. Hryshchenko, V. O. (2014) Avtomatyzatsiia keruvannia systemoiu stvorennia mikroklimatu v kameri plodoovochoeshkovyshch [Automation control system create the microclimate in the storage chamber fruit and vegetables]. Scientific Journal NUBiP Ukraine. Series: Engineering and Energy AIC, 194(2), 206–210.

5. Martynenko, I. I., Girnyk, N. L., (1984). Avtomaticheskoe upravlenie temperaturno-vlazhnostnymi rezhimami sel'skhozajstvennykh obektov [Automatic control of temperature-humidity modes of agricultural facilities]. Moscow: Kolos, 152.

6. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., Shvydia V. O. (2016) Vrakhuвання rozpodilenosti parametriv pry modeliuванні dynamichnykh susharok silskohospodarskykh materialiv [Considering the distributed account settings at modeling dryers dynamic agricultural materials]. Agricultural machinery, 34, 74–80.

7. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A. (2011) Analitychne doslidzhennia teplomasoperenosu v товстому shari materialu pry dvostadiinomu protsesi sushinnia zerna [Analytical study of heat and mass transfer in a thick layer of material at a two-stage process of drying grain]. Scientific Journal NUBiP Ukraine, 166(4), 138–147.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ НАСЫПИ ЗЕРНА КАК ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В. А. Грищенко, А. Д. Курганский, Б. И. Котов

Аннотация. В статье дан анализ последних исследований по применению технологии охлаждения зернового материала непосредственно в хранилищах путем вентилирования насыпи холодным воздухом. Для определения динамических характеристик объекта моделирования использованы аналитически-расчетный метод, сущность которого заключается в следующем: на основе априорной информации о физической картине явлений, происходящих при взаимодействии слоя зерна с источником тепловыделений (биохимического характера) с охлаждающим воздухом, составляются уравнения теплового баланса в дифференциальной форме в частных производных, которые определяют градиенты параметров воздуха по высоте. Тепло- и массообменные процессы при охлаждении зерновых материалов путем отвода теплоты от материала конвективным способом при фильтрации воздуха описаны типичными уравнениями теплового и материального баланса в виде замкнутой системы.

Получена математическая модель динамических режимов охлаждения влажного зерна в неподвижном слое при активной вентиляции, которую можно решить в средах MathCAD (MATLAB) при неизменных расходах воздуха. Путем линеаризации нелинейных уравнений и применяя к ним преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях, получена система дифференциальных уравнений в операторной форме. Получена структурная схема линейной математической модели, которая может быть использована для синтеза и анализа САУ процессом охлаждения зерна в хранилище.

Ключевые слова: математическая модель, передаточная функция, насыпь зерна, охлажденный воздух

MATHEMATICAL MODELING OF THE COOLING PROCESS OF THE GRAIN PULP, AS OBJECTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

V. O. Hryshchenko, A. D. Kurgan, B. I. Kotov

Annotation. The article analyzes the latest research on the application of the technology of cooling grain material directly in storage facilities by venting the mound with cold air. To determine the dynamic characteristics of the modeling object, the analytical-calculation method is used, the essence of which is as follows: on the basis of a priori information on the physical picture of the phenomena occurring when the grain layer interacts with the source of heat (biochemical) with cooling air, the heat balance equations in differential form in private Derivatives, which determine the gradients of air parameters in height. Heat and mass transfer processes during the cooling of grain materials by the removal of heat from the material by convective method during air filtration are described by typical equations of thermal and material balance in the form of a closed system.

A mathematical model of dynamic regimes for cooling moist grain in a fixed bed with active ventilation, which can be solved in MathCAD (MATLAB) environments with constant air flow, is obtained. By linearizing non-linear equations and applying Laplace transformations to them under zero initial conditions, we obtain a system of differential equations in operator form. A block diagram of a linear mathematical model is obtained that can be used to synthesize and analyze the automatic control system by the process of cooling the grain in a storage facility.

Keywords: *mathematical model, transfer function, grain embankment, cooled air*

УДК 621.316.929(088.8)

ЕКВІВАЛЕНТНА СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ОСНОВІ АНАЛОГА ЛЯМБДА-ДІОДА

І. О. ПОПОВА, кандидат технічних наук, доцент
С. Ф. КУРАШКІН, кандидат технічних наук, доцент
Таврійський державний агротехнічний університет
E-mail: irinapopova54@mail.ru

Анотація. *Робота присвячена розробці схеми заміщення аналога лямбда-діода на комплементарних польових транзисторах в якості первинного перетворювача та її дослідження з метою отримання рівняння залежності струму стоку від напруги на затискачах аналога лямбда-діода в залежності від параметрів схеми заміщення. Була складена повна еквівалентна схема заміщення аналогу лямбда-діода і проаналізовано її параметри з огляду на типові параметри застосованих кремнієвих польових транзисторів, що дало змогу спростити схему. Подальші дослідження дозволили отримати рівняння вольт-амперної характеристики лямбда-діода.*

Практичний інтерес має використання аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача будь-якої фізичної величини, для чого аналог лямбда-діода був застосований у мостовій схемі вимірювача температури. У одній з діагоналей мостового вимірювача використовуються нелінійні елементи, опір яких залежить від температури.

Отримано рівняння вольт-амперної характеристики з урахуванням параметрів мостового вимірювача, що дає змогу стверджувати про можливість використання аналогу лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача. Область застосування аналога лямбда-діода широка.