

УДК 631.362.3

Моделювання нестационарних процесів тепло-масообміну при охолодженні зерна в щільному шарі потоком повітря

Грищенко В. О., к.т.н., ст. викл., Національний університет біоресурсів і природокористування України

Котов Б. І., проф., д.т.н., Вінницький національний аграрний університет

Анотація

Мета. Створення математичних моделей для аналізу нестационарних режимів охолодження зерна в нерухомому шарі та розрахунку параметрів обладнання.

Методи. Об'єктом моделювання та дослідження є стаціонарний насип зернового матеріалу, який продувається охолодженим повітрям. Специфіка об'єкту (різні форми насипу зерна і способи подачі повітря) обумовлюють аналітичний метод досліджень на основі аналізу теплового і матеріального балансів зерна і повітря та рівнянь тепло- і масообміну.

Результати. Представлені математичні моделі нестационарних процесів тепло- і масообміну в нерухомому щільному шарі зернового матеріалу, який охолоджується фільтрацією повітря, яка враховує інтенсивність джерел самоігрівання й вологовидалення зернової маси та зміну в часі параметрів охолоджуючого повітря.

Отримано наближені розв'язки рівнянь і компактні аналітичні залежності, які визначають зміну параметрів зерна й охолоджуючого повітря за координатою та в часі, які дозволяють проводити багатовимірні розрахунки одновимірних полів температури й вологовмісту в нестационарному режимі.

Висновки

1. Сформульована математична модель процесів нестационарного тепло- і масообміну в щільному нерухомому шарі зернового матеріалу при активному вентиляванні охолодженим повітрям.

2. Запропоновано метод наближеного розрахунку нестационарних одномірних полів температури та вологовмісту зерна й охолоджуючого повітря.

Ключові слова: зерновий матеріал, нерухомий шар, охолодження, охолоджуюче повітря, активне вентилявання, теплообмін, масообмін.

UDC 631.362.3

Modeling of non-stationary processes of heat-mass transfer during cooling of grain in a dense layer by an air stream

Hryshchenko V., PhD. tech. sciences, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Kotov B., prof., Doctor of Tech. Sciences, Vinnitsa National Agrarian University

Annotation

Purpose. Creation of mathematical models for analysis of non-stationary modes of grain cooling in a fixed layer and calculation of equipment parameters.

Methods. The object of modeling and research is a stationary mound of grain material, which is

blown through chilled air. The specificity of the object (various forms of grain embankment and air supply methods) determine the analytical method of research on the basis of analysis of the heat and material balances of grain and air and heat and mass transfer equations.

Results. Presented mathematical models of non-stationary processes of heat and mass transfer in a fixed dense layer of grain material, which is cooled by air filtration, which takes into account the intensity of sources of self-warming and removal of moisture from the grain mass and the change in the parameters of the cooling air over time. Approximate solutions of the equations and compact analytic dependences of the grain parameters and cooling air that determine the change in the coordinate and time are obtained, which allow multidimensional calculations of one-dimensional temperature and moisture content fields in the non-stationary regime.

Conclusions

1. A mathematical model of the processes of non-stationary heat and mass transfer in a dense fixed layer of grain material is formulated with active cooling by cooled air.

2. The method of approximate calculation of non-stationary one-dimensional fields of temperature and moisture content of grain and cooling air is proposed.

Keywords: grain material, fixed layer, cooling, air cooling, active ventilation, heat exchange, mass transfer.

УДК 631.362.3

Моделирование нестационарных процессов тепло-массообмена при охлаждении зерна в плотном слое потоком воздуха

Грищенко В. А., к.т.н., ст. преп., Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Котов Б. И., проф., д.т.н., Винницкий национальный аграрный университет

Аннотация

Цель. Создание математических моделей для анализа нестационарных режимов охлаждения зерна в неподвижном слое и расчета параметров оборудования.

Методы. Объектом моделирования и исследования является стационарная насыпь зернового материала, который продувается охлажденным воздухом. Специфика объекта (различные формы насыпи зерна и способы подачи воздуха) обуславливают аналитический метод исследований на основе анализа теплового и материального балансов зерна и воздуха и уравнений тепло- и массообмена.

Результаты. Представлены математические модели нестационарных процессов тепло- и массообмена в неподвижном плотном слое зернового материала, который охлаждается фильтрацией воздуха, которая учитывает интенсивность источников самосогревания и влагоудаления из зерновой массы и изменение во времени параметров охлаждающего воздуха. Получены приближенные решения уравнений и компактные аналитические зависимости определяющих изменение параметров зерна и охлаждающего воздуха по координате и во времени, которые позволяют проводить многомерные расчеты одномерных полей температуры и влагосодержания в нестационарном режиме.

Выводы

1. Сформулирована математическая модель процессов нестационарного тепло- и массообмена в плотном неподвижном слое зернового материала при активной вентиляции охлажденным воздухом.

2. Предложен метод приближенного расчета нестационарных одномерных полей температуры и влагосодержания зерна и охлаждающего воздуха.

Ключевые слова: зерновой материал, неподвижный слой, охлаждение, охлаждение воздуха, активное вентилирование, теплообмен, массообмен.

Постановка проблеми. Скорочення строків збирання урожаю зернових культур при використанні високопродуктивних комбайнів і транспортних засобів висуває жорсткі вимоги прискорення обробки зернового матеріалу і підготовки його до тривалого зберігання. Наявної сушильної техніки для негайного висушування зерна в господарствах недостатньо, а нарощування потужності зерносушарок з обмеженим строком експлуатації економічно недоцільно. Тому значна частина зерна, що надходить на післязбиральну обробку потребує тимчасового збереження.

Запобігти самозігріванню і псуванню свіжозібраного вологого зерна можна тільки охолодженням. Охолодження зернової маси зменшує інтенсивність біохімічних процесів життєдіяльності зерна, мікро флори і шкідників, що дозволяє підвищити надійність і термін зберігання зернового матеріалу.

Основний спосіб зберігання зернових мас – зберігання насипом в механізованих сховищах ангарного та бункерного типів, або силосах. Найбільш розповсюджений і ефективний метод охолодження – активне вентилявання зовнішнім повітрям. Останнім часом набуло поширення застосувати активне вентилявання зерна штучно охолодженим повітрям із застосуванням парокомпресорних холодильних установок (стаціонарних або пересувних). Одною з основних вимог до систем охолодження є енергетична ефективність. Для визначення необхідної холодопродуктивності холодильної установки і раціональних режимів її функціонування необхідно мати дані про статичні та динамічні характеристики об'єкта охолодження, тобто насипу зерна в режимі активного вентилявання.

Аналіз публікацій і досліджень. Переваги і перспективи охолодження зернового матеріалу атмосферним повітрям або штучно охолодженим повітрям в сховищах різного типу проаналізовано в роботах [1–10]. У роботах [1, 2] визначено фактори, що впливають на збереженість зернової маси, і визначено режими зберігання в сховищах різного типу, в тому числі й із штучним охолодженням стаціонарними холодильними установками.

Основні переваги активного вентилявання зерна для відведення теплоти самозігрівання доведені в роботі [6]. Аналіз холодильного устаткування, ефективність його використання і режими збереження зерна при машинному охолодженні подані в роботах [5, 8].

Дослідження процесів тепло- і масообміну при охолодженні насипу зерна висвітлені в роботах [11–16]. Аналіз розроблених методів моделювання та

розрахунків динамічних характеристик процесу охолодження показує широку спрямованість виконаних досліджень для різних варіантів реалізації процесу охолодження зерна (включаючи рані роботи Анискіна, Рибарука, Поплевіна та ін.). Однак математичного опису процесу охолодження зерна активним вентиляванням з урахуванням одночасної дії джерел самозігрівання і випаровування, зміни параметрів охолоджуючого повітря у відомих роботах не представлено. Залишилось поза увагою також питання математичного моделювання процесу активного вентилявання в бункері з радіальним розподілом повітря.

Мета роботи – створення математичних моделей для аналізу нестационарних режимів охолодження зерна в нерухомому шарі та розрахунку параметрів обладнання.

Результати. Механізм процесу відведення теплоти від зерна до охолодженого повітря (конвективним способом) можна представити спрощеною схемою: суха речовина і волога в зернівці мають однакову в усіх точках температуру й вологовміст, тобто процеси охолодження й зневоднення – безградієнтні; волога видаляється за законом випаровування з вільної поверхні; тепло і вологообмін відбувається тільки між поверхнею зерна і повітрям; між елементами зернового шару теплообміну не відбувається; всі види тепломасообміну між повітрям і зерном враховуються коефіцієнтами тепло- і масообміну; теплофізичні характеристики зерна й повітря від температури не залежать і в часі не змінюються; теплообміном з оточуючим (атмосферним) середовищем нехтуємо; температурні поля приймаємо одномірними в напрямку фільтрації повітря.

Нестационарний процес тепло- і масообміну, за зазначених умов, для плоского шару (насипу) для елементарного шару dx , в загальному випадку може бути описано системою диференціальних рівнянь в частинних похідних четвертого порядку [15, 17]:

$$m_z c_z \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - m_0 r_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} = -\alpha f(\theta - t) - q_{h..}, \quad (1)$$

$$m_a c_a \frac{\partial t}{\partial \tau} + c_a GH \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha f (\theta - t), \quad (2)$$

$$-m_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} = \beta f' (d''(\theta) - d) \rho_a, \quad (3)$$

$$m_a \frac{\partial d}{\partial \tau} + GH \frac{\partial d}{\partial x} = -m_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (4)$$

де $q_h = \frac{q}{H}$ – питомі виділення біологічної теплоти на одиницю висоти шару;

θ, t – температура зернового матеріалу і повітря;

u, d – вологовміст зернового матеріалу й повітря;

m_z, m_a – маса зерна й повітря в обсязі шару;

c_z, c_a – питома теплоємність зерна й повітря;

H – висота шару зерна;

G – витрати повітря;

f, f' – загальна поверхня зерна і поверхня випаровування;

α, β – коефіцієнт теплообміну і масообміну;

$d''(\theta)$ – вологовміст насиченого повітря при температурі поверхні матеріалу;

ρ_z, ρ_{z0} – густина вологого і абсолютно сухого зерна;

ρ_a – щільність повітря;

F_z, F – площа перерізу зернового матеріалу й повітря в обсязі шару;

x – координата по висоті шару;

τ – час.

Система гіперболічних диференціальних рівнянь, як показує досвід числового моделювання достатньо точно описує динаміку тепло і масообмінних процесів, але аналітичного розв'язку немає. Для отримання наближених аналітичних залежностей, зміни параметрів зерна й повітря зробимо спрощуючи перетворення.

Використовуючи визначення критерія Ребіндера $Rb = \frac{c_z d \theta}{r_0 du}$ після диференціювання

за часом матимемо:

$$-\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{c_z}{r_0 Rb} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \quad (5)$$

Підставляючи (5) в рівняння (1) отримаємо спрощене рівняння (виключили невідому змінну u):

$$m_z c'_z \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + q_h = \alpha f (t - \theta). \quad (6)$$

У роботі [17] показано, що за умови постійної температури повітря (міжзернового повітряного середовища) величина тепловиділень рослинного «дихаючого» матеріалу пропорційна різниці температур зерна й повітря, тоді величину q_h апроксимуємо виразом:

$$q_h = \varepsilon_0(\theta - t), \quad (7)$$

де ε_0 – емпіричний коефіцієнт.

Величини зміни параметрів повітря в часі $G \frac{\partial t}{\partial \tau}$ та $G \frac{\partial d}{\partial \tau}$ достатньо малі у порівнянні з іншими членами рівнянь (1) і (4) та ними можна знехтувати.

Враховуючи наведені спрощення рівняння (1) і (2) приведемо до такого вигляду:

$$\begin{cases} t - \theta = \frac{1}{B} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \varepsilon \\ \theta - t = \frac{1}{A} \frac{\partial t}{\partial h} \end{cases}, \quad (8)$$

$$\text{де } A = \frac{\alpha f}{HGc_a}; \quad B = \frac{\alpha f}{m_z c_z}; \quad \varepsilon = \frac{q_h}{\alpha f}.$$

Граничні умови:

$$\theta|_{\tau=0} = \theta_0; \quad t|_{x=0} = t_0. \quad (9)$$

Розв'язок системи (8)–(9) (рівняння Анзеліуса-Шумана) відомий:

$$\theta = \theta_0 - (\theta_0 - t_0) B e^{-Ax} \int_0^{\tau} e^{-B\tau} J_0(2\sqrt{ABx\tau}) d\tau, \quad (10)$$

$$t = \theta_0 + (t_0 - \theta_0) e^{-Ax} \left(e^{-B\tau} J_0(2\sqrt{ABx\tau}) \right) + B \int_0^{\tau} e^{-B\tau} J_0(2\sqrt{ABx\tau}) d\tau, \quad (11)$$

де J_0 – функція Бесселя нульового порядку від мнимого аргументу $b = B(1 + \varepsilon_0)$.

Для спрощених розрахунків можна розкласти функцію Бесселя в ряд і обмежитись тільки першим членом ряду:

$$\theta \approx \theta_0 - \Delta T_0 e^{-Ax} (1 - e^{-B\tau}), \quad (12)$$

$$t = t_0 + \Delta T_0 e^{-Ax}, \quad (13)$$

де $\Delta T_0 = (\theta_0 - t_0)$.

При охолодженні зерна в нерухомому шарі атмосферним повітрям параметри його змінюються на протязі доби (добові коливання температури). Приймемо, що температура повітря на вході в шар зерна змінюється за синусоїдальним законом:

$$t = \bar{t}_i + A_t \sin \omega \tau, \quad (14)$$

де \bar{t}_i, A_t – середньодобове значення температури атмосферного повітря і амплітуда коливань;

$$\omega = \frac{1}{T} - \text{частота коливань.}$$

Використовуюючи залежність (14) як граничну умову до системи рівнянь (8) відповідно до [18] можна отримати розв'язок у вигляді:

$$\theta = \theta_0 + be^{-Ax} \left[\begin{array}{l} (\bar{t}_i - \theta_0) \int_0^{\tau} e^{-bx} J_0(2\sqrt{Abx\tau}) d\tau + \\ + k \int_0^{\tau} \sin \omega(\tau - \xi) e^{-b\xi} J_0(2\sqrt{Abx\xi}) d\xi \end{array} \right], \quad (15)$$

$$t = \theta_0 + (\bar{t}_i - \theta_0) e^{-Ax} \left[\begin{array}{l} e^{-b\tau} J_0(2\sqrt{Abx\tau}) + b \int_0^{\tau} e^{-b\tau} J_0(2\sqrt{Abx\tau}) d\tau + \\ + k \left(\int_0^{\tau} \sin \omega(\tau - \xi) e^{-b\xi} J_0(2\sqrt{Abx\tau}) d\xi - \right. \\ \left. - \omega \int_0^{\tau} \cos \omega(\tau - \xi) e^{-b\xi} J_0(2\sqrt{Abx\tau}) d\xi \right) \end{array} \right]. \quad (16)$$

Для визначення нестационарного поля вологовмісту зерна і повітря в шарі при охолодженні вологого матеріалу апроксимуємо функцію $d''(\theta)$ лінійною залежністю:

$$d''(\theta) = a\theta + b, \quad (17)$$

де a, b – коефіцієнти апроксимації.

З рівнянь (3) і (4) з урахуванням (17) отримаємо рівняння:

$$T_d \frac{dd}{dx} + d = B_1 - B_2(\tau) e^{-Ax}, \quad (18)$$

де $B_1 = a_1\theta_0 + b_1$; $B_2(\tau) = a_1\Delta T_0(1 - e^{-b\tau})$.

Розв'язок рівняння (18) за граничних умов: $x = 0; d = d_1$ отримано у вигляді:

$$d(x, \tau) = \left(d_1 - B_1 - \frac{B_2(\tau)}{1 - AT_d} \right) e^{-\frac{1}{T_d}x} + \frac{B_2(\tau)}{1 - AT_d} e^{-Ax}. \quad (19)$$

З рівнянь (3) і (4) маємо:

$$-m_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} = GH \frac{\partial d}{\partial x}. \quad (20)$$

Взявши диференціал від залежності (19) за x і підставивши отримане значення в рівняння (20) після інтегрування і відповідних перетворень отримаємо рівняння розподілу вологовмісту зерна в шарі за координатою для будь якого моменту часу:

$$F(x) = \frac{a_1 \Delta T_0}{m_0 (1 - T_d A)} \left(\frac{1}{T_d} e^{-\frac{x}{T_d}} - A e^{-Ax} \right), \quad (21)$$

$$u = u_1 - \frac{a_1}{b_1} \Delta T_0 F_2(x) (1 - e^{-b\tau}) - \frac{GH}{m_0} (F_1(x) - a_1 \Delta T_0 F_2(x)) \tau, \quad (22)$$

де

$$F_1(x) = \left(\frac{d_1 - B_1}{T_d} + \frac{1}{T_d (1 - T_d A)} \right) e^{-\frac{x}{T_d}}; \quad F_2(x) = \frac{A}{1 - T_d A} e^{-Ax}.$$

Висновки

1. Сформульована математична модель процесів нестационарного тепло- і масообміну в щільному нерухомому шарі зернового матеріалу при активному вентиляванні охолодженим повітрям.

2. Запропоновано метод наближеного розрахунку нестационарних одномірних полів температури та вологовмісту зерна й охолоджуючого повітря.

Бібліографія

1. Малин Н. И. Технология хранения зерна. М.: Колос, 2005. 280 с.
2. Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов, В. А. Буханцов, Б. К. Маратов, А. С. Прокопец. Ростов на/Д: МарТ, 2001. 231 с.
3. Кюрчев С. В., Верхованцева В. О. Особенности хранения зерновых запасов. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. Вип. 15. Т. 3. С. 189–193.
4. Петруня Б. Н., Кудашев С. М., Тітлов О. С. Перспективи застосування штучного холоду для збереження зерна. *Наукові праці ОНАХТ*, 2004. Вип. 27. С. 26–30.
5. Верхованцева В. О. Обґрунтування режимних параметрів охолодження зернової сировини у процесі зберігання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Вінниц. нац. аграр. ун-т. Вінниця, 2016. 22 с.
6. Дринча В. М., Цыдендоржиев Б. Д. Основные концептуальные положения актив-

ного вентилирования зерна. *Энергосбережение в АПК. Вестник ОрелГАУ*. 2010. № 1 (22). С. 35–38.

7. Кюрчев С. В., Верхованцева В. О. Визначення параметрів оптимізації процесу охолодження зерна. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. 2015. Вип. 163. С. 228–239.

8. Петруня Б. Н., Титлов А. С., Кудашев С. Н. Перспективы использования холодильных систем для хранения зерна. *Хранение и переработка зерна*. 2002. № 12 (42). С. 33–34.

9. 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*. Вип. 21. С. 39–41.

10. Дмитрук Е. А. Использование искусственного холода при хранении зерна. *Хранение и переработка зерна*. 2000. № 10. С. 27–28.

11. Дослідження процесу теплообміну при охолодженні шару зерна пшениці / В. Ф. Ялпачик, С. Кюрчев, М. Стучаєв, В. Верхованцева. *Вісник Харківського національного університету сільського господарства*. 2015. Вип. 166. С. 50–55.

12. Kotov B., Kalinichenko R., Spirin A. Mathematical modeling of heat and mass transfer process under heat treatment of grain materials in dence layer. *ТЕКА. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin, 2015. Vol. 17. № 5. P. 54–57.

13. Грищенко В. О., Курганський О. Д., Котов Б. І. Математичне моделювання процесу охолодження насипу зерна як об'єкта з розподіленими параметрами. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2017. Вип. 261. С. 156–163.
14. Курганський О. Д., Котов Б. І. Аналіз способів охолодження зернового матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 2. С. 49–52.
15. Котов Б. И., Грищенко В. А. Математическое моделирование динамических режимов принудительного вентилирования плодов и овощей в плотном слое. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка "Механізація сільськогосподарського виробництва"*. 2014. Вип. 148. С. 382–388.
16. Котов Б. І., Калініченко Р. А. Аналітичне дослідження тепломасопереносу в товстому шарі матеріалу при двостадійному процесі сушіння зерна. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2011. Вип. 166, Ч. 4. С. 138–147.
17. Бодров В. И. Закономерности влагообмена в насыпи сочного растительного сырья и слое сохнувшей травы. *Вентиляция и кондиционирование воздуха промышленных и сельскохозяйственных зданий*. 1987. С. 20–27.
18. Рабинович Г. Д., Хорев В. И. Тепло и массообмен при сушке измельченных пастообразных материалов в плотном слое. *Инженерно-физический журнал*. 1965. Т. 9. № 5. С. 640–646.
4. Petrunia B. N., Kudashev S. M., Titlov O. S. Perspektyvy zastosuvannia shtuchnogo kholodu dlia zberezhennia zerna. *Naukovi pratsi ONAKhT*. 2004. Vyp. 27. S. 26–30.
5. Verkholtantseva V. O. Obgruntuvannia rezhymnykh parametriv okholodzhennia zernovoi syrovyny u protsesi zberihannia: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.12 / Vinnyts. nats. ahrar. un-t. Vinnytsia, 2016. 22 s.
6. Dryncha V. M., Tsyndendorzhyev B. D. Osnovnye kontseptualnye polozhenia aktyvnoho ventilyrovannia zerna. *Enerhosberezhenye v APK. Vestnyk OrelHAU*. 2010. № 1 (22). S. 35–38.
7. Kiurchev S. V., Verkholtantseva V. O. Vyznachennia parametriv optymizatsii protsesu okholodzhennia zerna. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. Petra Vasylenka*. 2015. Vyp. 163. S. 228–239.
8. Petrunia B. N., Tytlov A. S., Kudashev S. N. Perspektyvy yspolzovannia kholodnykh system dlia khranennia zerna. *Khranennye y pererabotka zerna*. 2002. № 12 (42). S. 33–34.
9. Konservatsiia zernovoi massy s yspolzovanniem yskusstvenno okhlazhdennoho vozdukh / H. N. Stankevych, B. N. Petrunia, Y. Y. Bychyniuk, Iu. V. Lyshchenko. *Naukovi pratsi Odeskoi derzhavnoi akademii kharchovykh tekhnolohii*. Vyp. 21. S. 39–41.
10. Dmytruk E. A. Yspolzovannye yskusstvennoho kholoda pry khranennii zerna. *Khranennye i pererabotka zerna*. 2000. № 10. S. 27–28.
11. Doslidzhennia protsesu teploobminu pry okholodzhenni sharu zerna pshenytsi / V. F. Yalpachyk, S. Kiurchev, M. Stuchaiev, V. Verkholtantseva. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu silskoho hospodarstva*. 2015. Vyp. 166. S. 50–55.
12. Kotov B., Kalinichenko R., Spirin A. Mathematical modeling of heat and mass transfer process under heat treatment of grain materials in dense layer. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin, 2015. Vol. 17. № 5. P. 54–57.
13. Hryshchenko V. O., Kurhanskyi O. D., Kотов B. I. Matematychnе modeliuвання процесу охолодження насипу зерна як об'єкта з розподіленими параметрами. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i*

Bibliografiia

1. Malyn H. Y. Tekhnolohiya khranennia zerna. M.: Kolos, 2005. 280 s.
2. Posleuborochnaia obrabotka y khranennye zerna / E. M. Voblykov, V. A. Bukhantsov, B. K. Maratov, A. S. Prokopets. Rostov na/D: MarT, 2001. 231 s.
3. Kiurchev S. V., Verkholtantseva V. O. Osobennosti khranennia zernovykh zapasov. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*. 2015. Vyp. 15. T. 3. S. 189–193.

pryrodokorystuvannia Ukrainy. Serii: Tekhnika ta enerhetyka APK. 2017. Vyp. 261. S. 156–163.

14. Kurhanskyi O. D., Kotov B. I. Analiz sposobiv okholodzhennia zernovoho materialu. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2016. № 2. S. 49–52.

15. Kotov B. Y., Hryshchenko V. A. Matematycheskoe modelyrovanye dynamycheskykh rezhymov prynudytelnogo ventylyrovanyia plodov y ovoshchei v plotnom sloe. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. Petra Vasylenka "Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva"*. 2014. Vyp. 148. S. 382–388.

16. Kotov B. I., Kalinichenko R. A. Analitichne doslidzhennia teplomasoperenosu v tovstomu shari materialu pry dvostadiinomu protsesi sushinnia zerna. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy*. 2011. Vyp. 166, Ch. 4. S. 138–147.

17. Bodrov V. Y. Zakonomernosty vlahoobmena v nasypy sochnoho rastytelnoho syria y sloe sokhnushchei travy. *Ventylatsiia y kondytsyonyrovanye vozdukhа promyshlennykh y selskokhoziaistvennykh zdanyi*. 1987. S. 20–27.

18. Rabynovych H. D., Khorev V. Y. Teplo y massoobmen pry sushke yzmelchennykh pastoobraznykh materyalov v plotnom sloe. *Ynzhenerno-fyzycheskyi zhurnal*. 1965. T. 9. No 5. S. 640–646.

Bibliography

1. Malin N. I. Technology of grain storage. M.: Kolos, 2005. 280 p.

2. Post-harvest processing and storage of grain / E. M. Voblikov, V. A. Bukhantsov, B. K. Maratov, A. S. Prokopets. Rostov on/D: March, 2001. 231 p.

3. Kyrchev S. V., Verholantseva V. O. Peculiarities of storage of grain reserves. *Proceedings of the Taurian State Agro-technological University*. 2015. Issue 15. T. 3. P. 189–193.

4. Petrunja B. M., Kudashev S. M., Titlov A. S. Prospects for the use of artificial cold for preservation of grain. *Scientific works ONAЧT*. 2004. No. 27. P. 26–30.

5. Verholantseva V. O. Justification of the regime parameters of cooling of grain raw materials in the process of storage: author's

abstract. dis. ... cand. tech sciences: 05.18.12 / Vinnitsa nats. agrar. un. Vinnytsya, 2016. 22 p.

6. Drinch V. M., Tsydendorzhiev B. D. Major conceptual positions of active ventilation of grain. *Energy saving in agrarian and industrial complex. Vestnik Orel GAU*. 2010. No. 1 (22). P. 35–38.

7. Kyrchev S. V., Verholantseva V. O. Determination of the parameters of optimization of the process of cooling the grain. *Bulletin of the Kharkov National Technical University of Agriculture named after Petr Vasylenko*. 2015. No. 163. P. 228–239.

8. Petrunya B. N., Titlov A. S., Kudashev S. N. Prospects of using refrigeration systems for grain storage. *Storage and processing of grain*. 2002. No. 12 (42). P. 33–34.

9. Preservation of grain mass with the use of artificially cooled air / G. N. Stankevich, B. N. Petrunya, I. I. Bichinuk, Yu. V. Lishchenko. *Scientific papers of the Odessa State Academy of Food Technologies*. Issue 21. P. 39–41.

10. Dmitruk E. A. The Use of Artificial Cold for Storage of Grain. *Storage and Processing of Grain*. 2000. No. 10. P. 27–28.

11. Investigation of the heat exchange process in a cooled layer of wheat grain / Yalpachik V. F., Kirchev S., Stuzhaev M., Verholantseva V. *Bulletin of Kharkiv National University of Agriculture*. 2015. No. 166. P. 50–55.

12. Kotov B. I., Kalinichenko R., Spirin A. Mathematical modeling of heat and mass transfer process under heat treatment of grain materials in dense layer. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin, 2015. Issue 17. No. 5. P. 54–57.

13. Grishchenko V. O., Kurgansky O. D., Kotov B. I. Mathematical modeling of the cooling process of grain embossing as an object with distributed parameters. *Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Power Engineering of Agroindustrial Complex*. 2017. Issue 261. P. 156–163.

14. Kurgansky O. D., Kotov B. I. Analysis of methods for cooling grain material. *Engineering, power engineering, transport of agrarian and industrial complex*. 2016. No. 2. P. 49–52.

15. Kotov B. I., Grishchenko V. A. Mathematical modeling of dynamic regimes of

forced ventilation of fruits and vegetables in a dense layer. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture Petro Vasilenko "Mechanization of agricultural production"*. 2014. Issue 148. P. 382–388.

16. Kotov B. I., Kalinichenko R. A. Analytical study of heat and mass transfer in a thick layer of material in a two-stage grain drying process. *Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2011. Issue 166, Ch. 4 P. 138–147.

17. Bodrov V. I. The regularities of moisture exchange in the mound of juicy plant material and a layer of drying grass. *Ventilation and air conditioning of industrial and agricultural buildings*. 1987. P. 20–27.

18. Rabinovich G. D., Horev V. I. Heat and mass transfer during drying of crushed pasty materials in a dense layer. *Engineering-Physical Journal*. 1965. Issue 9. No. 5. P. 640–646.