

УДК 631.363.536

Математичне моделювання стаціонарних режимів установок для охолодження і нагріву дисперсних сільськогосподарських матеріалів

Калініченко Р. А., к.т.н., доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, e-mail: rkalinichenko@ukr.net.

Котов Б. І., д.т.н., професор, Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна

Анотація

Мета. Розробка аналітичної математичної моделі тепло- і масообмінних процесів під час конвективного охолодження і нагріву дисперсних сільськогосподарських матеріалів для спрощеного розрахунку раціональних параметрів і режимів проведення технологічних процесів агропромислового виробництва.

Методи. Базуються на аналізі аналітичних математичних залежностей теорії тепло- і масообміну, законах збереження та методах математичного моделювання. Дослідження проведені і оброблені з використанням пакетів прикладних програм фірм “Wolfram Research”, “Parametric Technology Corporation”.

Результати. У статті подано математичну модель стаціонарного теплообміну в апараті для термообробки дисперсного матеріалу з перехресним рухом. Отримані аналітичні залежності для наближених розрахунків розподілу за координатами температури матеріалу і тепло- або

холодоносія. Аналітичний розв'язок представленої системи рівнянь отриманий за певних спрощень, що з достатньою точністю для інженерних розрахунків описує кінетику конвективної термообробки зернового матеріалу.

Висновки

1. Унаслідок проведених теоретичних досліджень розроблено математичну модель для опису стаціонарних процесів конвективного охолодження і нагріву дисперсного матеріалу під час перехресного руху матеріалу й охолоджуючого повітря (або теплоносія).

2. Отримано компактні формули розподілу параметрів матеріалу та тепло- або холодоносія в щільному рухомому шарі в напрямках руху перехресних потоків. Визначені формули дозволяють проводити розрахунки режимів діючих установок конвеєрного і колонкового типів.

Ключові слова: тепло- і масообмін, математична модель, охолодження, шар дисперсного матеріалу.

UDC 631.363.536

Mathematical modeling of stationary modes of installations for cooling and heating of dispersed agricultural materials

Kalinichenko R. A., PhD, associate professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, e-mail: rkalinichenko@ukr.net

Kotov B. I., Prof., PhD., Podilsky State Agrarian Technical University (PDATU), Kamyanets-Podilskyi, Ukraine

Annotation

Purpose. Development of analytical mathematical model of heat and mass transfer processes in convective cooling and heating of dispersed agricultural materials for the simplified calculation of rational parameters and modes of technological processes of agro-industrial production.

Methods. Based on the analysis of analytical mathematical dependences of the theory of heat-mass transfer, conservation laws and methods of

mathematical modeling. The researches were carried out and processed using application packages of the companies “Wolfram Research”, “Parametric Technology Corporation”.

Results. The article presents a mathematical model of stationary heat exchange in the apparatus for heat treatment of dispersed material with cross-sectional motion. The analytical dependences for approximate calculations of distribution along the coordinates of the temperature of the material and the

heat (cold) of the carrier are obtained. An analytical solution of the presented equation system is obtained with certain simplifications, which with sufficient accuracy for engineering calculations describes the kinetics of convective heat treatment of grain material.

Conclusions

1. As a result of the theoretical studies, a mathematical model for the description of stationary processes of convective cooling and heating of

disperse material during cross-flow of material and cooling air (or heat carrier) was developed.

2. Compact formulas for the distribution of material parameters and cold (heat) carrier in a dense moving layer in the directions of cross flow are obtained. The defined formulas allow to carry out calculations of modes of operating installations of conveyor and column types.

Keywords: heat and mass transfer, mathematical model, cooling, layer of disperse material.

УДК 631.363.536

Математическое моделирование стационарных режимов установок для охлаждения и нагрева дисперсных сельскохозяйственных материалов

Калиниченко Р. А., к.т.н., доцент, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, e-mail: rkalinichenko@ukr.net

Котов Б. И., д.т.н., профессор, Подольский государственный аграрно-технический университет (ПДАТУ), г. Каменец-Подольский, Украина

Аннотация

Цель. Разработка аналитической математической модели тепло- и массообменных процессов при конвективном охлаждении и нагреве дисперсных сельскохозяйственных материалов для упрощенного расчета рациональных параметров и режимов проведения послеуборочных технологических процессов агропромышленного производства.

Методы. Базируются на анализе аналитических математических зависимостей теории тепло- и массообмена, законах сохранения и методах математического моделирования. Исследования проведены и обработаны с использованием пакетов прикладных программ фирм "Wolfram Research", "Parametric Technology Corporation".

Результаты. В статье представлена математическая модель стационарного теплообмена в аппарате для термообработки дисперсного материала с перекрестным движением. Получены аналитические зависимости для приближенных расчетов распределения по координатам температуры материала и тепло- или хладоносителя. Аналитическое решение представленной системы уравнений получено при определенных упрощениях, что с достаточной точностью для инженерных расчетов описывает кинетику конвективной термообработки зернового материала.

Выводы

1. В результате проведенных теоретических исследований разработана математическая модель для описания стационарных процессов конвективного охлаждения и нагрева дисперсного

материала при перекрестном движении материала и охлаждающего воздуха (или теплоносителя).

2. Получены компактные формулы распределения параметров материала и тепло- или хладоносителя в плотном подвижном слое в направлении движения перекрестных потоков. Полученные формулы позволяют проводить расчеты режимов действующих установок конвейерного и колонкового типов.

Ключевые слова: тепло- и массообмен, математическая модель, охлаждение, слой дисперсного материала

Постановка проблеми. Для процесів сушіння, нагрівання і охолодження зерна різних сільськогосподарських матеріалів використовують значну кількість установок різного типу і конструктивного виконання з рухомим щільним шаром. Це, насамперед – конвеєрні і колонкові установки, в яких реалізовано різні технологічні схеми конвективного підведення або відведення теплоти з перехресним рухом матеріалу. Порівняльна оцінка діючих і нових технологічних схем термообробки зерна та їх конструктивне оформлення ускладнені за відсутності аналітичного опису процесів тепло- і масообміну в щільному (неперемішуючому) шарі зручного для рішення інженерних задач.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі методи розрахунків безперервно діючих сушарок сільськогосподарських хар-

чових продуктів оснований на статичних рівняннях теплового і матеріального балансу висвітлені у фундаментальних працях [1–3]. Використання для розрахунків тепло- і масообмінних режимів в апаратах із перехресним рухом матеріалу методів розрахунку динаміки процесів у нерухомому шарі подано в роботах [4–7]. Аналітичний розв’язок рівнянь теплообміну в шарі нерухомого матеріалу [8] дуже громіздкий, що ускладнює його використання в інженерних розрахунках. Методика ступінчастого методу розрахунків [9, 10] вимагає програмного забезпечення для розрахунків на ЕОМ.

Мета досліджень. Розробка аналітичної математичної моделі тепло- і масообмінних процесів під час конвективного охолодження і нагріву дисперсних сільськогосподарських матеріалів для спрощеного розра-

хунку раціональних параметрів і режимів проведення технологічних процесів агропромислового виробництва.

Методи досліджень. Bazуються на аналізі аналітичних математичних залежностей теорії тепло- і масообміну, законах збереження та методах математичного моделювання. Дослідження проведені і оброблені з використанням пакетів прикладних програм фірм “Wolfram Research”, “Parametric Technology Corporation”.

Результати досліджень. Зерно переміщується в шарі (без перемішування) в горизонтальній площині (на конвеєрі) або вертикально під дією сили тяжіння між двома перфорованими поверхнями (колонкові пристрої) і продувається примусово повітряним потоком (охолоджуючим агентом), схема представлена на рисунку 1.

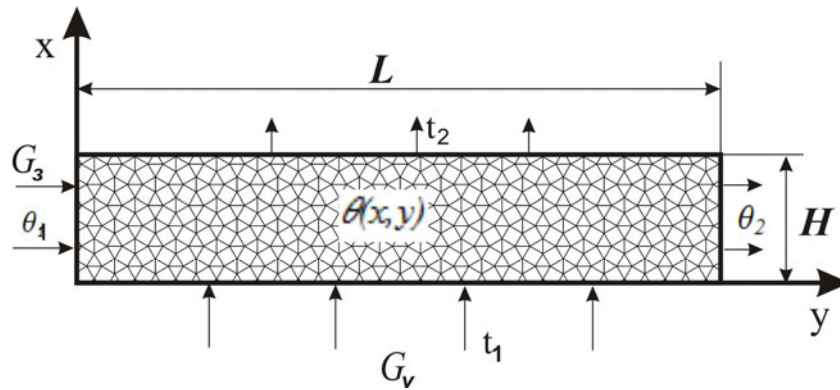


Рис. 1. Розрахункова схема процесу охолодження зерна в рухомому шарі
Fig. 1. The calculation scheme of the process of cooling the grain in the moving layer

Зерновий матеріал переміщується в напрямку осі OY, а охолоджуюче повітря – в напрямку OX.

Математична модель процесу теплообміну дисперсного матеріалу може бути сформульована як система диференціальних рівнянь, згідно літературних джерел [11, 13], в сукупності теплового балансу та теплообміну і записана як:

$$m_v C_v \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_v C_v H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha f (\theta - t); \quad (1)$$

$$m_3 C_3 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + G_3 C_3 L \frac{\partial \theta}{\partial y} = \alpha f (t - \theta); \quad (2)$$

$$G_v C_v dt = -G_3 C_3 d\theta. \quad (3)$$

Перші два рівняння описують зміну температури повітря і матеріалу внаслідок теплообміну за координатою і в часі; третє

рівняння визначає тепловий баланс між повітрям і матеріалом – зменшення ентальпії матеріалу дорівнює збільшенню ентальпії повітря.

У стаціонарному (усталеному) режимі температура взаємодіючих середовищ у кожній точці об’єму має фіксоване значення для будь-якого моменту часу. Тому похідні за часом у рівняннях (1) і (2) дорівнюють нулю і переписуються як:

$$T_x \frac{\partial t}{\partial x} = \theta - t; \quad (4)$$

$$T_y \frac{\partial \theta}{\partial y} = t - \theta, \quad (5)$$

де $T_x = \frac{m_v C_v v_v}{\alpha f}$;

$$T_y = \frac{m_3 C_3 v_3}{\alpha f};$$

v_v, v_3 – швидкості фільтрації повітря і переміщення матеріалу, відповідно.

За наявності вологовидалення в процесі теплообміну (наприклад, під час охолодження недосушеного зерна) в рівняння (3) слід додати член, який враховує кількість теплоти, що витрачається на видалення вологи:

$$G_v C_v dt = -G_3 C_3 d\theta + G_0 r_0 dU, \quad (6)$$

де G_0 – витрати абсолютно сухого матеріалу;

r_0 – питома теплота пароутворення;

U – вологовміст матеріалу.

Використовуючи визначення критерію

Рейнхольда: $Rb = \frac{C_3 d\theta}{r_0 dU}$, зробимо заміну

$-dU = d\theta \frac{C_3}{r_0 Rb}$ у рівнянні (6) і матимемо:

$$G_v C_v dt = -G_3 C'_3 d\theta, \quad (7)$$

де $C'_3 = C_3 \left(1 + \frac{1}{Rb}\right)$.

Оскільки під час охолодження зерна після сушарки зерно зневоднюється в середньому на 1–1,5%, то криву сушіння можна апроксимувати з достатньою точністю однією прямою, за таких параметрів критерій Рейнхольда приймаємо незмінним: $Rb = const$ [7].

Інтегруючи рівняння (7) у межах $\theta_1 - \theta$ і $t - t_1$ (де θ_1, t_1 – температура матеріалу і повітря на вході в установку), матимемо:

$$G_v C_v (t - t_1) = G_3 C'_3 (\theta_1 - \theta), \quad (8)$$

звідки отримаємо:

$$t = a_1 + b_1 \theta; \quad (9)$$

$$\theta = a_2 + b_2 t, \quad (10)$$

де $a_1 = t_1 + R_1 \theta_1$; $b_1 = -R_1$;

$$R_1 = \frac{G_3 C'_3}{G_v C_v};$$

$a_2 = \theta_1 + b_2 t_1$; $b_2 = -R_2$;

$$R_2 = \frac{G_v C_v}{G_3 C'_3} = \frac{1}{R_1} - \text{позначення параметричних комплексів кінетичних коефіцієнтів.}$$

Підставляючи (10) у рівняння (4), матимемо:

$$T_x \frac{dt}{dx} = a_2 - (1 - b_2)t. \quad (11)$$

Після поділу змінних і розв'язку рівняння (11) за граничних умов $x = 0$; $t(0) = t_1$ отримаємо:

$$t(x) = \frac{a_2}{b_2} - \left(\frac{a_2}{b_2} - t_1\right) \cdot \exp\left(-\frac{b_2'}{T_x} x\right), \quad (12)$$

де $b_2' = (1 - b_2)$.

Підставляючи (9) у рівняння (2), матимемо:

$$T_y \frac{d\theta}{dy} = a_1 - b_1' \theta, \quad (13)$$

де $b_1' = (1 - b_1)$.

Розв'язок рівняння (13) за граничних умов $y = 0$; $\theta(0) = \theta_1$ (θ_1 – температура зерна в шарі на вході):

$$\theta(x) = \frac{a_1}{b_1'} - \left(\frac{a_1}{b_1'} - \theta_1\right) \cdot \exp\left(-\frac{b_1'}{T_y} y\right). \quad (14)$$

Продиференціюємо рівняння (7) за y , отримаємо:

$$-\frac{dt}{dy} = R_1 \frac{d\theta}{dy}. \quad (15)$$

Продиференціювавши рівняння (14), матимемо:

$$\frac{d\theta}{dy} = \frac{b_1'}{T_y} \left(\frac{a_1}{b_1'} - \theta_1\right) \cdot \exp\left(-\frac{b_1'}{T_y} y\right) \quad (16)$$

або

$$\frac{d\theta}{dy} = B_1 \cdot \exp\left(-\frac{b_1'}{T_y} y\right), \quad (16 a)$$

де $B_1 = \frac{b_1'}{T_y} \left(\frac{a_1'}{b_1'} - \theta_1 \right)$.

З рівнянь (15) і (16 а) отримаємо:

$$-\frac{dt}{dy} = R_1 B_1 \cdot \exp\left(-\frac{b_1' y}{T_y}\right). \quad (17)$$

Інтегрування (17) за умови, що $y = 0$; $t(0) = t_1$, дає залежність:

$$t(y) = t_1 - \frac{T_y}{b_1'} R_1 B_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{b_1' y}{T_y}\right) \right). \quad (18)$$

Продиференціюємо рівняння (7) за x і підставимо в отримане рівняння похідну $\frac{dt(x)}{dx}$ з рівняння (12), після перетворень отримаємо:

$$R_1 \frac{d\theta}{dx} = -\frac{b_2'}{T_x} \left(\frac{a_2'}{b_2'} - t_1 \right) \cdot \exp\left(-\frac{b_2' x}{T_x}\right). \quad (19)$$

Інтегруючи рівняння (19) за умови, що $x = 0$; $\theta(0) = \theta_1$, після перетворень отримаємо залежність:

$$\theta(x) = \theta_1 - \frac{1}{R_1} \left(\frac{a_2'}{b_2'} - t_1 \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{b_2' x}{T_x}\right) \right). \quad (20)$$

Запишемо рівняння (7) у повних диференціалах:

$$-\left[\frac{\partial t}{\partial y} dy + \frac{\partial t}{\partial x} dx \right] = R_1 \left[\frac{\partial \theta}{\partial y} dy + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right]. \quad (21)$$

Розділимо обидві частини рівняння (21) на dy :

$$-\frac{\partial t}{\partial y} - S \frac{\partial t}{\partial x} = R_1 \frac{\partial \theta}{\partial y} + S R_1 \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad (22)$$

Підставивши значення похідних (24), (26), (27) у рівняння (22), отримаємо:

$$(1 - S) \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{R_1} B_3 K_4 \exp(-K_3 y) - S B_4 K_4 \exp(-K_4 x). \quad (28)$$

Після поділу змінних та інтегрування рівняння (28) за граничних умов $y = 0$; $x = 0$; $\theta(0,0) = \theta_1$ отримаємо залежність:

$$\theta(y, x) = \theta_1 + \frac{R_2}{1 - S} B_3 (1 - \exp(-K_3 y)) + \frac{S}{1 - S} B_4 K_4 y \exp(-K_4 x). \quad (29)$$

де $\frac{dx}{dy} \approx \frac{\Delta x}{\Delta y} \approx \frac{H}{L} = S$ – відношення висоти шару зерна до його довжини.

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{a_2'}{b_2'} - t_1; & K_1 &= \frac{b_2'}{T_x}; \\ B_2 &= \frac{a_1'}{b_1'} - \theta_1; & K_2 &= \frac{b_1'}{T_y}; \\ B_3 &= \frac{T_y}{b_1'} R_1 B_1; & K_3 &= \frac{b_1'}{T_y} = K_2; \\ B_4 &= \frac{1}{R_1} \left(\frac{a_2'}{b_2'} - t_1 \right); & K_4 &= \frac{b_2'}{T_x} = K_1. \end{aligned}$$

Перепишемо рівняння (12), (14), (18), (20) з використанням наведених позначень і, продиференціювавши їх за відповідними змінними (x, y), отримаємо:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = B_1 K_1 \exp(-K_1 x); \quad (23)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = B_2 K_2 \exp(-K_2 y); \quad (24)$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} = -B_3 K_3 \exp(-K_3 y); \quad (25)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = -B_4 K_4 \exp(-K_4 x). \quad (26)$$

З рівнянь (4) і (5) отримаємо:

$$-\frac{\partial t}{\partial x} = R_1 \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad \text{або} \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = -R_2 \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (27)$$

Аналогічним способом визначаємо залежність температури теплоносія від координат (за висотою і довжиною) рухомого шару матеріалу:

$$\frac{\partial t}{\partial y} = -(S+1)R_1B_2K_2 \exp(-K_2y) + SR_1B_4K_4 \exp(-K_4x). \quad (30)$$

Після інтегрування рівняння (30) за умов $y = 0; x = 0; t(0,0) = t_1$ отримаємо:

$$t(x,y) = t_1 - (S+1)R_1B_2(1 - \exp(-K_2y)) + SR_1B_4K_4y \exp(-K_4x). \quad (31)$$

На рисунках 2 і 3 зображені криві, що розраховані за залежностями (29) і (31).

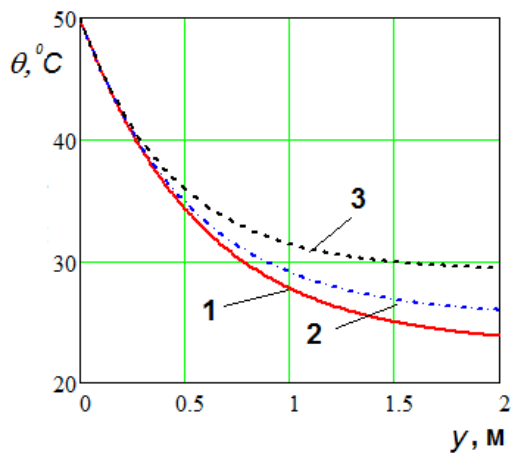


Рис.2. Кінетика охолодження зерна в рухомому шарі

Fig.2. Kinetics of cooling of grain in a moving layer
 $(\theta_0 = 50 \text{ }^\circ\text{C}; t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}; G_V = 6000 \text{ м}^3 \cdot \text{год/т};$
 $1 - x = 0,1 \text{ м}; 2 - x = 0,1 \text{ м}; 3 - x = 0,4 \text{ м})$

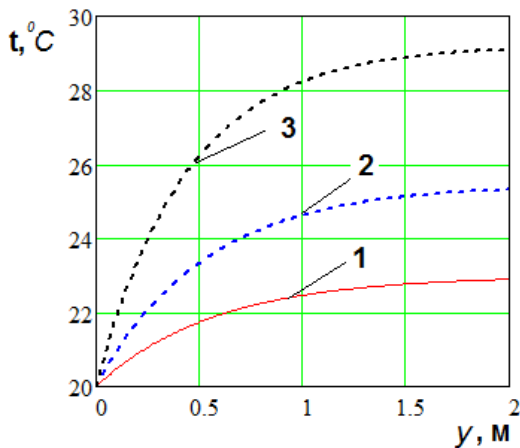


Рис.3. Кінетика нагріву повітря в рухомому шарі зерна

Fig. 3. Kinetics of heating of air in a moving layer of grain
 $(\theta_0 = 50 \text{ }^\circ\text{C}; t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}; G_V = 6000 \text{ м}^3 \cdot \text{год/т};$
 $1 - x = 0,1 \text{ м}; 2 - x = 0,1 \text{ м}; 3 - x = 0,4 \text{ м})$

За необхідності визначення зміни вологовмісту матеріалу під час нагрівання або охолодження можна використовувати рівняння Ликова [12] в такому вигляді:

$$U(y,x) = U_p(\varphi,t) + (U_0 - U_p(\varphi,t)) \exp\left(-\frac{K_c}{v_3} t(x,y)\right), \quad (32)$$

де $U_p(\varphi,t)$ – рівноважний вологовміст, визначається як функція температури і відносної вологості оточуючого середовища за формулою Гендерсона [9];

$K_c(t(x,y))$ – коефіцієнт сушіння як функція розподілу температури охолоджуючого повітря або теплоносія в шарі дисперсного матеріалу.

Висновки

1. Унаслідок проведених теоретичних досліджень розроблено математичну модель для опису стаціонарних процесів конвективного охолодження і нагріву дисперсного матеріалу під час перехресного руху матеріалу й охолоджуючого повітря (або теплоносія).

2. Отримано компактні формули розподілу параметрів матеріалу та тепло- або холодносія в щільному рухомому шарі в напрямках руху перехресних потоків. Визначені формули дозволяють проводити розрахунки режимів діючих установок конвеєрного і колонкового типів.

Бібліографія

1. Мальтри В., Пётке Э., Шнайдер Б. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения. М.: Машиностроение, 1979. 525 с.

2. Гришин М. А., Атаназевич В. М., Семенов Ю. Г. Установки для сушки пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1989. 215 с.

3. Кей Р. Б. Введение в технологию промышленной сушки. Минск: Наука и техника, 1983. 261 с.

4. Станкевич Г. Н., Овсянникова Л. К., Веселовская О. Ю. Обоснование параметров колонковых сушилок для семян подсолнечника. *Наукові праці ОДАХТ*. Одеса, 2002. Вип. 24. С. 9–13.

5. Активне вентилування та сушіння зерна / О. І. Гапонюк, М. В. Остапчук, Г. М. Станкевич [та ін.]. Одеса: Поліграф, 2014. 324 с.

6. Снежкин Ю. Ф., Сорокова Н. Н., Шапарь Р. А. Энергосберегающий способ сушки термоблабильных материалов в ленточной сушильной установке непрерывного действия. *Наукові праці ОДАХТ*. Одеса, 2014. Вип. 45. Т. 2. С. 117–124.

7. Фролов В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. 208 с.

8. Лобанов И. Е. Точное аналитическое решение задачи о полном распределении температур вплоть до концов регенератора с высокотеплопроводной насадкой с произвольно распределенной температурой (задача Анцелиуса–Нусельта) и его следствия. *Альманах современной науки и образования*. 2009. № 12. Ч. 1. С. 54–66.

9. Методические рекомендации по математическому моделированию процесса сушки и охлаждения зерна в установках плотного слоя / Л. В. Демин, Ю. В. Есаков, И. Э. Мильман, Т. А. Ананьева. М.: ВИЕСХ, 1977. 42 с.

10. Анискин В. И., Окунь Г. С., Верцман И. И. Моделирование процесса низкотемпературной сушки зерна в слое с помощью ЭВМ. *Сб. науч. тр. ВИМ*. М.: ВИМ, 1988. № 115. С. 25–29.

11. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Курганський О. Д. Тепло і масообмін при сушінні і охолодженні зернового матеріалу у щільному

рухомому шарі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. Вип. 4 (96). С. 64–67.

12. Гинзбург А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М.: Агропроиздат, 1985. 339 с.

13. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження): монографія / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, С. П. Степаненко, В. О. Швидя, В. О. Лісецький. Ніжин: Видавель ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.

Bibliografia

1. Maltri V., Pyotke E., Shnayder B. *Sushilnyie ustanovki selskohozyaystvennogo naznacheniya*. M.: Mashinostroenie, 1979. 525 s.

2. Grishin M. A., Atanazevich V. M., Semenov Yu. G. *Ustanovki dlya sushki pischevyykh produktov*. M.: Agropromizdat, 1989. 215 s.

3. Key R. B. *Vvedenie v tehnologiyu promyshlennoy sushki*. Minsk: Nauka i tehnika, 1983. 261 s.

4. Stankevich G. N., Ovsiyannikova L. K., Veselovskaya O. Yu. *Obosnovanie parametrov kolonkovyykh sushilok dlya semyan podsolnechnika*. *Naukovi pratsi ODAHT*. Odesa, 2002. Vip. 24. S. 9–13.

5. *Aktivne ventilyuvannya ta sushllynya zerna* / O. I. Gaponyuk, M. V. Ostapchuk, G. M. Stankevich [ta in.]. Odesa: Poligraf, 2014. 324 s.

6. Snezhkin Yu. F., Sorokovaya N. N., Shapar R. A. *Energoberegayuschiy sposob sushki termolabilnykh materialov v lentochnoy sushilnoy ustanovke nepreryivnogo deystviya*. *Naukovi pratsi ODAHT*. Odesa, 2014. Vip. 45. T. 2. S. 117–124.

7. Frolov V. F. *Modelirovanie sushki dispersnykh materialov*. L.: Himiya, 1987. 208 s.

8. Lobanov I. E. *Tochnoe analiticheskoe reshenie zadachi o polnom raspredelenii temperatur vplot do kontsov regeneratora s vyisokoteploprovodnoy nasadkoy s proizvolno raspredelennoy temperaturoy (zadacha Antseliusa–Nuselta) i ego sledstviya*. *Almanah sovremennoy nauki i obrazovaniya*. 2009. № 12. T. 1. S. 54–66.

9. *Metodicheskie rekomendatsii po matematicheskomu modelirovaniyu protsessa sushki i ohlazhdeniya zerna v ustanovkakh plotnogo sloya* / L. V. Demin, Yu. V. Esakov, I. E. Milman, T. A. Ananeva. M.: VIESH, 1977. 42 s.

10. Aniskin V. I., Okun G. S., Vertsman I. I. *Modelirovanie protsessa nizkotemperaturnoy sushki zerna v sloe s pomoschyu EVM*. *Sb. nauch. tr. VIM*. M.: VIM, 1988. № 115. S. 25–29.

11. Kotov B. I., Kalinichenko R. A., Kurganskiy O. D. *Teplo i masoobmin pri sushinni i oholodzhenni zernovogo materialu u schilnomu ruhomomu shari*. *Tehnika, energetika, transport APK*. 2016. Vip. 4 (96). S. 64–67.

12. Ginzburg A. S. *Raschet i proektirovanie sushilnykh ustanovok pischevoy promyshlennosti*. M.: Agropromizdat, 1985. 339 s.

13. Modelyuvannya tehnologichnih protsesiv v tipovih ob'ektah pislyazbiralnoyi obrobki i zberigannya zerna (separatsiya, sushynnya, aktivne ventilyuvannya, oholodzhennya): monograflya / B. I. Kotov, R. A. Kalinichenko, S. P. Stepanenko, V. O. Shvidya, V. O. Lisetskiy. Nizhin: Vidavets PP Lisenko M. M., 2017. 552 s.

References

1. Malthus V., Potkie E., Schneider B. Drying plants for agricultural purposes. M.: Mechanical Engineering, 1979. 525 p.
2. Grishin M. A., Atanasevich V. M., Semenov Yu. G. Installations for drying food products. M.: Agropromizdat, 1989. 215 p.
3. Kay R. B., Introduction to Industrial Drying Technology. Minsk: Science and Technology, 1983. 261 p.
4. Stankevich G. N., Ovsyannikova L. K., Veselovskaya O. Yu. Justification of the parameters of column dryers for sunflower seeds. *Scientific works of ODAHT*. Odessa, 2002. Issue 24. Pp. 9–13.
5. Active ventilation and drying of grain / A. I. Gaponyuk, M. V. Ostapchuk, G. M. Stankevich [and others.]. Odessa: Polygraph, 2014. 324 p.
6. Snezhkin Yu. F., Sorokova N. N., Shapar R. A. Energy-saving method of drying thermolabile materials in a continuous drying device. *Scientific works of ODAHT*. Odessa, 2014. No. 45. Vol. 2. Pp. 17–124.
7. Frolov V. F. Modeling of drying disperse materials. Leningrad: Chemistry, 1987. 208 p.
8. I. E. Lobanov. An exact analytical solution of the problem of the complete distribution of temperatures down to the ends of the regenerator with a high-heat-conducting packing with an arbitrarily distributed temperature (the Ancelius – Nuselt problem) and its corollaries. *Almanac of modern science and education*. 2009. No. 12. Part 1. Pp. 54–66.
9. Guidelines for mathematical modeling of the process of drying and cooling of grain in dense layer installations / L. V. Demin, Yu. V. Esakov, I. E. Milman, T. A. Ananyeva. Moscow: VIESH, 1977. 42 p.
10. Aniskin V. I., Okun G. S., Vertsman I. I. Simulation of the process of low-temperature drying of grain in a layer with the help of a computer. *Sat scientific tr. Vim*. Moscow: VIM, 1988. No. 115. Pp. 25–29.
11. Kotov B. I., Kalinichenko R. A., Kurgansky O. D. Heat and mass transfer during drying and cooling of grain material in a dense moving layer. *Engineering, power engineering, transport of agro-industrial complexes*. 2016. No. 4 (96). Pp. 64–67.
12. Ginzburg A. S. Calculation and design of drying installations for the food industry. Moscow: Agropromizdat, 1985. 339 p.
13. Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling): monograph / B. I. Kotov, R. A. Kalinichenko, S. P. Stepanenko, V. O. Shvyda, V. O. Lisetski. Nizhyn: Publisher PE Lysenko M. M., 2017. 552 p.