

УДК 631.32:662.997

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

*Р. А. Калініченко, кандидат технічних наук, доцент*

*ВП НУБіП України "Ніжинський агротехнічний інститут"*

*Б. І. Котов, доктор технічних наук, професор*

*Ю. І. Панцир, кандидат технічних наук, доцент*

*І. Д. Герасимчук, кандидат технічних наук, доцент*

*Подільський державний аграрно-технічний університет*

*E-mail: rkalinichenko@ukr.net*

**Анотація.** Нині в Україні термічне сушіння є основним методом підготовки сільськогосподарських матеріалів до консервації. Зменшення енерговитрат на сушіння зернових матеріалів – актуальна проблема, яка вирішується двома основними шляхами – технічною модернізацією наявного сушильного обладнання і розробкою нових енергозберігаючих прийомів і режимів сушіння сільськогосподарських матеріалів та їх реалізації на наявних і модернізованих у господарствах установках. І перший, і другий шлях вирішення проблеми енергозбереження ґрунтується на математичному описі процесів тепло- і масообміну.

Математична модель сушіння дисперсного сільськогосподарського матеріалу в роботі представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь в частинних похідних, в якій відображена змінна визначальних параметрів процесу сушіння в часі і просторі з урахуванням добової зміни інтенсивності нагрівання сушильного агента в сонячному колекторі.

Метою проведених досліджень було визначення динаміки розвитку взаємопов'язаних нестационарних полів температури і вологовмісту матеріалу і сушильного агента на основі математичних моделей процесів тепло- і масообміну в шарі дисперсного матеріалу при конвективному підведенні теплоти.

Реалізація цієї математичної моделі в стандартному математичному пакеті дозволяє аналізувати продуктивність роботи обладнання, зокрема геліоколекторів, для конвективного сушіння дисперсних сільськогосподарських матеріалів в щільному шарі в залежності від параметрів матеріал, що подається на сушіння, інтенсивності сонячного випромінювання та ефективності його сприйняття, добових коливань температури атмосферного повітря.

**Ключові слова:** *тепломасообмін, математична модель, геліоколектор, сонячна енергія*

**Актуальність.** Сушіння сільськогосподарської рослинної сировини є основним з обов'язкових процесів підготовки продукції до зберігання. Сушінню підлягають кормові трави, зерно, льняний і насінневий ворох та інші. Для висушування таких матеріалів широко використовують активне вентилявання атмосферним (коли дозволяють погодні умови) або підігрітим повітрям. Сушіння таким способом здійснюють за місцем зберігання в зерно- і сіносковищах, бункерах, в штабелях (трави, льняний ворох) під навісами та скирдах просто неба. Сушіння атмосферним повітрям малоефективне, нагрівання повітря теплогенераторами або електрокалориферами – енергозатратне. Сушіння рослинних матеріалів з нагріванням повітря в сонячних генераторах-геліоколекторах дозволяє суттєво знизити енергоємність сушильних процесів і забезпечує високу якість висушеного продукту.

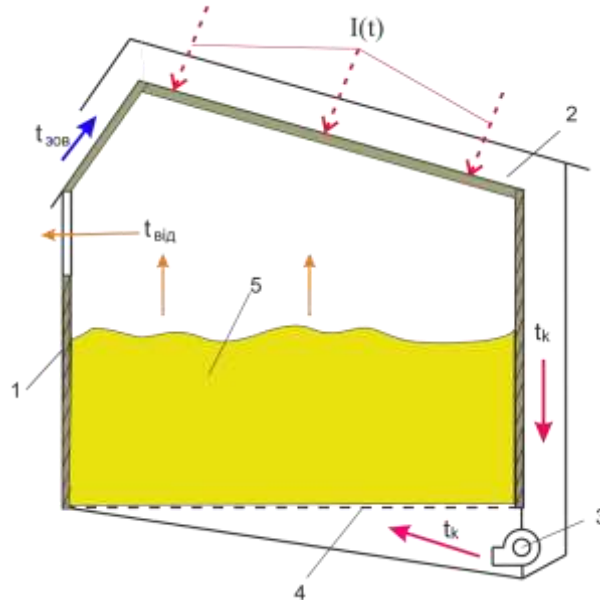
**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання застосування сонячної енергії в технологічних процесах сільськогосподарського виробництва, в тому числі і для сушіння, досить повно висвітлено в літературних джерелах [1-7]. Застосування геліонагрівачів для підвищення ефективності процесів сушіння рослинної сировини подано в роботах [1-3]. Конструкції сонячних колекторів для нагрівання повітря і методи їх розрахунку описано в монографіях [4-5]. Питання моделювання теплових процесів у колекторах для нагрівання повітря подано в [6-7]. Теоретичні питання дослідження процесу сушіння рослинних матеріалів, у тому числі із використанням геліонагрівання сушильного агента, визначені в роботах [8, 9].

**Мета дослідження** – створення і дослідження математичного опису процесу сушіння рослинного матеріалу активним вентиляванням при нагріванні сушильного агента сонячним випромінюванням змінної в часі потужності.

**Матеріали і методи дослідження.** Специфіка питання (наявність значного різноманіття конструкцій сонячних колекторів і установок вентилявання) зумовлює використання аналітичного узагальнення опису процесів тепло- і масообміну при сушінні нерухомого шару матеріалу фільтрацією сушильного агента змінних параметрів. Основою складання математичного опису є аналіз теплового і

матеріального балансу матеріалу і сушильного агента – нагрітого в геліоколекторі повітря для нестационарного режиму. Для опису процесів у геліоколекторі використана спрощена схема.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Розрахунково-технологічна схема досліджуваного процесу наведена на рис.1.



**Рис.1. Розрахунково-технологічна схема об'єкта моделювання:**

- 1-сховище, 2-сонячний колектор, 3-вентилятор, 4- повітророзподільувач (решітка),  
5-висушуваний матеріал

Оскільки конструкція дахового геліоколектора використовує односторонню схему відведення теплоти поглиненої сонячної радіації, то математичну модель теплових процесів сформулюємо для одного повітряного каналу у вигляді системи таких рівнянь:

$$m_p c_p \frac{dt_k}{d\tau} = G_p c_p \cdot (t_3 - t_k) + \alpha \cdot F \cdot (t_{\text{від}} - t_k) + k_0 F_0 \cdot (t_3 - t_k) \quad (1)$$

$$m_a c_a \frac{d\theta}{d\tau} = I \cdot F_0 + \alpha \cdot F \cdot (t_{\text{від}} - \theta) \quad (2)$$

де  $\bar{t} = (t_3 + t_k) \cdot 0,5$  – середнє значення температури по довжині колектора;  
 $t_3$  – температура атмосферного повітря, що дорівнює температурі на вході в

колектор;  $\theta$ ,  $t_k$  – температура адсорбента і повітря на вході колектора;  $I$  – інтенсивність падаючої сонячної радіації, Вт/м<sup>2</sup>;  $\epsilon, \tau$  – коефіцієнти поглинання і пропускання сонячного опромінення прозорою оболонкою колектора;  $F$  – поглинальна поверхня адсорбера, м<sup>2</sup>;  $m_p$ ,  $m_a$  – маса повітря в об'ємі колектора і маса адсорбера, кг;  $c_p$ ,  $c_a$  – питома теплоємність повітря і адсорбера, Дж/кг·°С;  $C_{Tp}$  – витрати повітря, кг/с;  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $F_0$  – поверхня світлопрозорої оболонки колектора.

Прийmemo, що температура зовнішнього повітря змінюється протягом доби за періодичним законом  $t_s = t_0 + t_m \cdot \sin \omega \tau$ , з періодом  $T$  ( $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ), а інтенсивність сонячної радіації  $I = I_m \sin \omega \tau$ .

Нагріте в геліоколекторі повітря  $t_k$  подається в нерухомий шар дисперсного матеріалу (знизу) і використовується як сушильний агент (теплоносій) поглинач вологи, що виділяється з матеріалу. Процеси тепло- і масообміну при сушінні матеріалу фільтрацією нагрітого повітря, відповідно до спрощеної фізичної моделі [8] представимо системою диференціальних рівнянь:

$$m_m c_m \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - m_0 r \frac{\partial U}{\partial \tau} = \alpha \cdot f \cdot (\theta - t_s) \quad (3)$$

$$m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_p c_p \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha \cdot f \cdot (t_s - t) \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = k (\theta - t) (U - U_p); \quad (5)$$

$$m_p \frac{\partial d}{\partial \tau} + G_p H \frac{\partial d}{\partial x} = \nabla m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (6)$$

де  $t$ ,  $\theta$  - температура сушильного агента і матеріалу;  $m_m$ ,  $m_0$ ,  $H$  – маса матеріалу в шарі висотою  $H$  і маса сухого матеріалу;  $m_p$ ,  $G_p$  – маса повітря в об'ємі шару і питома витрати;  $c_m$ ,  $c_p$  – питома теплоємність матеріалу і повітря;  $U$ ,  $d$  – вологовміст матеріалу і повітря;  $r$  – питома теплота пароутворення;  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну;

$f$  – поверхня теплообміну;  $k(t, \theta)$  – коефіцієнт сушіння;  $U_p$  – рівноважний вологовміст матеріалу.

Системи рівнянь (1-6) за умови  $t_n \approx t_s$  описує нестационарні тепломасообмінні процеси при сушінні матеріалу нагрітим в сонячному колекторі повітрям.

Оскільки аналітичний розв'язок отриманої систем неможливий, а числові розв'язки потребують знання всіх коефіцієнтів, що входять у рівняння, початкових значень похідних змінних параметрів, визначення нестационарних параметрів досліджуваних процесів будемо визначати наближеними методами, не змінюючи загальне фізичне уявлення про природу реальних процесів. Для цього спростимо рівняння, що входять до системи (1-6).

Враховуючи незначну теплову інерцію адсорбера сонячної енергії, представимо геліоколектор одноємнісним об'єктом, для чого приймемо  $\frac{d\theta}{d\tau} = 0$ , а теплоємність адсорбера додамо до теплоємності повітряного об'єму колектора. Тоді з рівнянь (1-2) матимемо після перетворень

$$T_k \frac{dt_k}{d\tau} = A_t - P \cdot \cos \omega \tau; \quad (7)$$

$$\text{де } T_k = 0.5 \frac{m_a c_a + m_p c_p}{G_p c_p + 0.5 k_0 F_0}; \quad A_t = \frac{t_{z\max} - t_{z\min}}{2}; \quad P = \frac{F \alpha \tau}{G_p c_p + 0.5 k_0 F_0} + A_t.$$

Перша складова в рівнянні (4) набагато менша (складає наближено 0,05 % від другої) і нею можна знехтувати.

Друга складова в рівнянні (3) визначає кількість теплоти, яка витрачається на випаровування вологи і її можна визначити як інтенсивність початкового джерела теплоти, яка в числовому еквіваленті близька до величини підведеної теплоти і є пропорційною температурному напору, тобто можна прийняти з певним наближенням, що:

$$\theta - r \frac{dU}{d\tau} = q; \quad \frac{q}{\alpha f} m_0 \approx \varepsilon = \varepsilon_0 \approx \theta;$$

де  $q$  – інтенсивність негативного джерела теплоти;  $\varepsilon_0$  – стала величина, незалежно від параметрів процесу.

З урахуванням зроблених спрощуючих припущень рівняння (3) і (4) запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{1}{B} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \theta = \varepsilon + t; \\ \frac{1}{A} \frac{\partial t}{\partial x} + t = \theta; \end{cases}$$

де  $A = \frac{\alpha f}{G_p c_p H}$ ;  $B = \frac{\alpha f}{m_m c_m}$ .

Початкова умова до рівняння (8):  $\tau = 0$ ;  $\theta = \theta_0$ , де  $\theta_0$  – початкова температура матеріалу прийнята рівною температурі повітря (умовно). Граничну умову до рівняння (9) визначимо з розв’язку рівняння (7), так як змінна температура на виході колектора  $t_k(\tau) = t_l(\tau)$  дорівнює температурі на вході в шар матеріалу.

Розв’язок неоднорідного диференціального рівняння (7) методом невизначених коефіцієнтів отримаємо в такому вигляді:

$$t_k = C_1 \cdot e^{\frac{\tau}{T_k}} + E \cdot \cos \omega \tau + F \cdot \sin \omega \tau; \tag{10}$$

де  $E = \frac{P \cdot T_k \cdot \omega}{T_k \omega^2 + 1}$ ;  $F = -\frac{P \cdot T_k \cdot \omega}{T_k \omega^2 + 1}$ ;  $\omega = \frac{\pi}{12 \cdot 3600}$ .

Сталу інтегрування  $C_1$  визначимо з початкової умови:  $\tau = 0$ ;  $t_k = t_{03}$ ;  $C_1 = t_{03} - E$ .

Розрахунки проведені за формулою (10) показують, що теплова інерційність, обумовлена теплоємністю елементів конструкції, не дуже впливає на перебіг зміни температури на виході колектора (час перехідного процесу  $\tau = 6..18.0$  хв). Тому з достатньою точністю для аналізу процесу сушіння зерна та інших матеріалів підігрітим в колекторі повітрям зміну в часі останнього параметру можна апроксимувати простою залежністю:

$$t_l(\tau) = t_{cp} + A_0 \sin \omega \tau \tag{11}$$

де  $t_{cp} = \frac{t_{max} + t_{min}}{2}$ ;  $A_0 = \frac{t_{max} - t_{min}}{2}$ ;

і використати її як граничну умову до рівняння (9).

Розв'язок системи рівнянь (8)-(9) із заданими початковими і граничною умовами відомий [10] і його можна представити у вигляді:

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 + B \cdot e^{-Ax} \left[ \theta_{cp} - \theta_0 \int_0^\tau e^{-B\tau} I_0(\sqrt{ABx\tau}) d\tau + A_0 \int_0^\tau \sin \omega(x - \xi) e^{-B\xi} \times \right] \quad (12)$$

$$t(x, \tau) = \theta_0 + \left\{ \left[ e^{-B\tau} I_0(\sqrt{ABx\tau}) + B \int_0^\tau e^{-B\tau} I_0(\sqrt{ABx\tau}) \right] + A_0 \times \right. \\ \left. + \theta_{cp} - \theta_0 e^{-Ax} \left\{ \int_0^\tau \sin \omega(x - \xi) e^{-B\xi} I_0(\sqrt{ABx\xi}) d\xi - \omega \int_0^\tau \cos \omega(x - \xi) e^{-B\xi} \times \right. \right. \quad (13)$$

Для спрощеного аналізу (з допущенням підвищення результату рішення на 10 %) можна обмежитись одним першим членом, тобто прийняти  $I_0(\sqrt{ABx\tau}) = 1$ , то виконавши інтегрування (12) і (13), отримаємо:

$$\theta(x, \tau) \approx \theta_0 + e^{-Ax} \left\{ \theta_{cp} - \theta_0 \left[ 1 - e^{-B\tau} \right] + \frac{A_0 B}{B^2 + \omega^2} \left[ B \sin \omega \tau + \omega \cos \omega \tau - \omega \cdot e^{-B\tau} \right] \right\}; \quad (14)$$

$$t(x, \tau) \approx \theta_0 + e^{-Ax} \left[ \theta_{cp} - \theta_0 + \frac{A_0}{B^2 + \omega^2} \left[ B^2 - \omega^2 \right] \sin \omega \tau + 2B\omega \cos \omega \tau \right]. \quad (15)$$

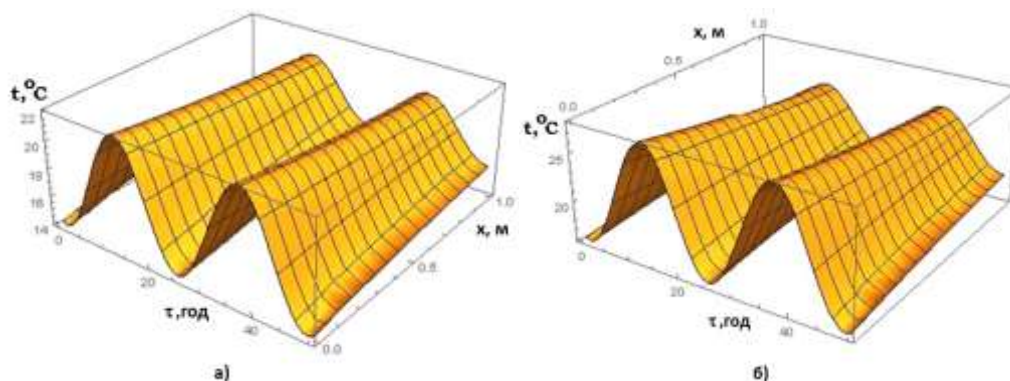
Зміну вологовмісту матеріалу в часі (кінетика сушіння) і за координатою визначимо з інтегруванням рівнянь (5) і (6) та при використанні залежностей [11], отримаємо:

$$U_p(x, d) = 37.19 \frac{d(x, \tau)}{t(x, \tau)}; \quad k = 0.025 \frac{\theta + t}{2}; \quad (16)$$

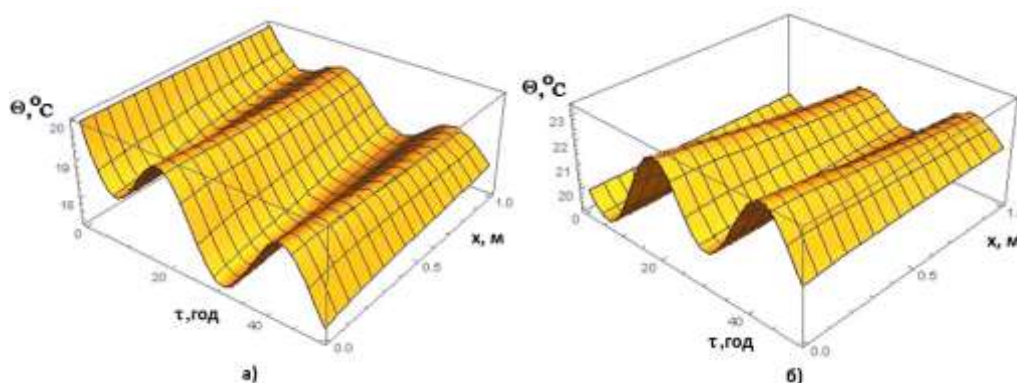
$$U(x, \tau) = \int_0^\tau k t(x, \tau) \theta(x, \tau) \cdot U - U_p t(x, \tau) d(x, \tau) d\tau; \quad (17)$$

$$d(x, y) = d_0 + \frac{m \cdot k \theta(x, t)}{G_y} \cdot U(x, y) - U_p d(x, t). \quad (18)$$

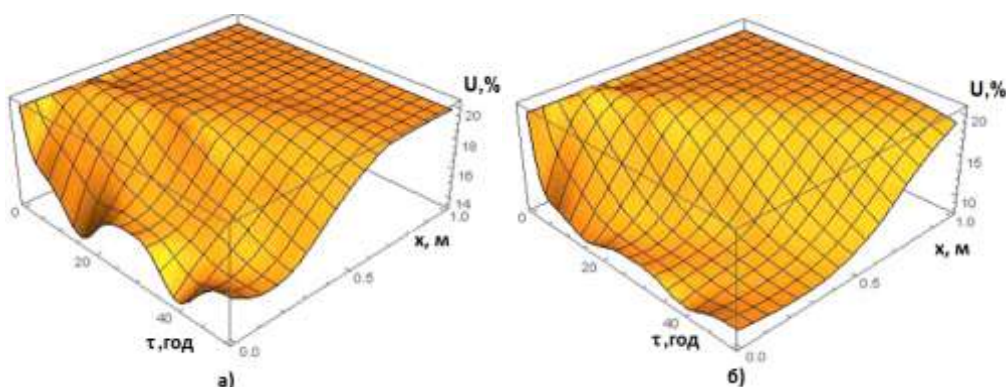
Підставляючи отримані залежності (14) і (15) в (17) з урахуванням (16) і (18) отримаємо математичну модель процесу з постійними коефіцієнтами, графічна інтерпретація розв'язку якої в математичному пакеті Mathematica представлено на рис.2, 3,4.



**Рис.2. Поле зміни температури сушильного агента в шарі матеріалу:**  
*а* – без геліоколектора, *б* – з підігріванням повітря в геліоколекторі



**Рис.3. Температурне поле шару матеріалу при вентиляванні:**  
*а* – без геліоколектора, *б* – з підігріванням повітря в геліоколекторі



**Рис.4. Поле вологовмісту шару матеріалу при вентиляванні:**  
*а* – без геліоколектора, *б* – з підігріванням повітря в геліоколекторі



**Висновки і перспективи.** Запропонована математична модель процесу сушіння сільськогосподарського матеріалу в щільному шарі активним вентиляванням із врахуванням змінних параметрів повітря, яке підігрівається в геліоколекторі і яким потім продувається зерно, дозволяє визначити динаміку розвитку температурного поля і вологовмісту матеріалу в залежності від конкретних параметрів кліматичних і виробничих умов.

Отримані наближені розв'язки наведеної теоретичної математичної моделі дозволяють з достатньою точністю ідентифікувати процеси тепломасообміну в товстому шарі матеріалу для подальшого визначення оптимальних режимів функціонування геліоколекторів з точки зору енерго-ресурсозбереження і якості кінцевого продукту.

### **Список літератури**

1. Бурнаєв М. Д. Дослідження роботи геліоколектора для підігріву повітря при активному вентиляванні сіна / М. Д. Бурнаєв // Нетрадиц. і понов. джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матер. І Міжнар. наук.-практ. конф., Львів, 2001. – С.159-163.

2. Котов Б. І. Математичне моделювання нагрівання в геліоколекторах для сушіння рослинної сировини / Б. І. Котов // Електрифікація та автоматизація сільського господарства, 2002. - №1. – С.107-109.

3. Даффи Джон А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии /пер. с англ. Д. А. Даффи, У. А. Бекман. – М.: Мир, 1977. – 420 с.

4. Аvezов Р. Р. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения / Р. Р. Аvezов, А. Ю. Орлов. – Ташкент: Фан, 1988. – 288 с.

5. Котов Б. И. Повышение эффективности солнечных коллекторов для подогрева воздуха / Б. И. Котов // Техника в сельском хозяйстве. – 1991. – № 2. – С.28-30.

6. Калафатов Є. Т. Дослідження двоканального сонячного колектора / Є. Т. Калафатов, В. І. Токаренко, І. Е. Калафатов // Праці Таврійської державної агротехнологічної академії. – 2005. – Вип. 31. – С. 133-137.

7. Козлов Я. М. Стільникові полікарбонатні пластики – основний конструктивний елемент полімерного сонячного колектора / Я. М. Козлов, М. П. Сухий, К. М. Сухий // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2010. – Вип. 37. – С 230-236.

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

9. Корчемний М. О. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Монографія / М. О. Корчемний, В. С. Федорейко, В. П. Щербань. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2004. – 974 с.

10. Kotov B. Mathematical modeling of heat and mass transfer process under heat treatment of grain materials in dense layer. / B. Kotov, R. Kalinichenko, A. Spirin //TeKa. Commission of motorization and energetic in agriculture. Lublin, 2016.Vol.16. №4. 35-42.(in English).

11. Ковбаса В. П. Комп'ютерне моделювання тепломасообміну в об'ємі зернової маси при вентиляванні повітрям із змінними параметрами / В. П. Ковбаса, Р. А. Калініченко, О. Д. Курганський. // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. –2016. – Вип. 252. – С.136-143.

### **Referenses**

1. Burnayev, M. D. (2001). Doslidzhennya roboty heliokolektora dlya pidhrivu povitrya pryy aktyvnomu ventylyuvanni sina [Investigation of the work of the helioclector for air heating in the active ventilation of the hay]. Lviv: Netradyts. i ponov. dzherela enerhiyi yak alternatyvni pervynnym dzherelam enerhiyi v rehioni: Mater. I Mizhnar. nauk.-prakt. konf., 159-163.

2. Kotov, B. I. (2002). Matematychnе modelyuvannya nahrivannya v heliokolektorakh dlya sushynnya roslynnoyi syrovyny [Mathematical modeling of heating in gel collectors for drying of plant material]. Elektryfikatsiya ta avtomatyzatsiya sil'skoho hospodarstva, 1, 107-109.

3. Daffi, Dzhon A.m Becman, W. A. (1977). Teplovyye protsessy s ispol'zovaniyem solnechnoy energii [Thermal processes using solar energy]. Moskow: Mir, 420.

4. Avezov, R. R., Orlov, A. YU. Solnechnyye sistemy otopleniya i goryachego vodosnabzheniya [Solar heating and hot water systems]. Tashkent: Fan, 288.

5. Kotov, B. I. (1991). Povysheniye effektivnosti solnechnykh kollektorov dlya podogreva vozdukha [Improving the efficiency of solar collectors for air heating]. Tekhnika v sel'skom khozyaystve, 2, 28 – 30.

6. Kalafatov, YE. T., Tokarenko, V. I., Kalafatov, I. E. (2005). Doslidzhennya dvokanal'noho sonyachnoho kollektora [Investigation of two-channel solar collector]. Pratsi Tavriys'koyi derzhavnoyi ahrotekhnolohichnoyi akademiyi, 31, 133-137.

7. Kozlov, YA. M., Sukhyy, M. P., Sukhyy, K. M. (2010) Stil'nykovi polikarbonatni plastyky – osnovnyy konstruktivnyy element polimernoho sonyachnoho kolektora [Cell polycarbonate plastics - the main constructive element of a polymeric solar collector]. Naukovi pratsi Odes'koyi natsional'noyi akademiyi kharchovykh tekhnolohiy, 37, 230-236.

8. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepaneko, S. P., Shvydya, V. O., Lisets'kyy V. O. (2017). Modelyuvannya tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'yektakh pislyazbyral'noyi obrobky i zberihannya zerna (separatsiya, sushynnya, aktyvne ventylyuvannya, okholodzhennya) [Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling)]. Nizhyn: Vydavets PP Lysenko M.M, 552.

9. Korchemnyy, M. O., Fedoreyko V. S., Shcherban V. P. (2004). Enerhozberezhennya v ahropromyslovomu kompleksi. Monohrafiya. [Energy saving in the agro-industrial complex]. Ternopil: Pidruchnyky i posibnyky, 974.

10. Kotov, B., Kalinichenko, R., Spirin, A. (2016). Mathematical modeling of heat and mass transfer process under heat treatment of grain materials in dense layer. Teka. Commission of motorization and energetic in agriculture. Lublin, 16 (4), 35-42.

11. Kovbasa, V. P., Kalinichenko, R. A., Kurhans'kyu O. D. (2016). Komp'yuterne modelyuvannya teplomasoobminu v ob'yemi zernovoyi masy pry ventylyuvanni povitryam iz zminnymy parametramy [Computer modeling of heat and mass transfer in the volume of grain mass in ventilation by air with variable parameters]. Naukovyy visnyk NUBiP Ukrayiny. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK, 252, 136-143.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ**

***Р. А. Калиниченко, Б. И. Котов, Ю. И. Панцирь, И. Д. Герасимчук***

**Аннотация.** *В настоящее время в Украине термическая сушка является основным методом подготовки сельскохозяйственных материалов к консервации. Уменьшение энергозатрат на сушку зерновых материалов - актуальная проблема, которая решается двумя основными путями – технической модернизацией имеющегося сушильного оборудования и разработкой новых энергосберегающих приемов и режимов сушки сельскохозяйственных материалов и их реализации на существующих и модернизированных в хозяйствах установках. И первый, и второй путь решения проблемы энергосбережения основывается на математическом описании процессов тепло- и массообмена. Математическая модель сушки дисперсного сельскохозяйственного материала в работе представлена в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, в которой отражено изменение определяющих параметров процесса сушки во времени и пространстве с учетом суточного изменения интенсивности нагрева сушильного агента в солнечном коллекторе.*

*Целью проведенных исследований было определение динамики развития взаимосвязанных нестационарных полей температуры и влагосодержания материала и сушильного агента на основе математических моделей процессов тепло- и массообмена в слое дисперсного материала при конвективном подводе теплоты.*

*Реализация данной математической модели в стандартном математическом пакете позволяет анализировать производительность работы оборудования, в частности гелиоколлекторов, для конвективной сушки дисперсных сельскохозяйственных материалов в плотном слое в зависимости от параметров материала подаваемого на сушку, интенсивности солнечного излучения и эффективности его восприятия, суточных колебаний температуры атмосферного воздуха.*

**Ключевые слова:** *тепло массообмен, математическая модель, гелиоколлектор, солнечная энергия*

## MODELING THE PROCESS FOR DRYING AGRICULTURAL MATERIALS USING SOLAR ENERGY

*R. Kalinichenko, B. Kotov, Y. Pancis, I. Gerasimchuk*

**Abstract.** *Today in Ukraine thermal drying is the main method of preparing agricultural materials for preservation. Reducing energy consumption for drying grain materials is an urgent problem that is solved in two main ways, the technical modernization of drying equipment available and the development of new energy-saving methods and modes of drying agricultural materials and their implementation on existing and modernized facilities at farms. And the first and second way of solving the problem of energy conservation is based on the mathematical description of heat and mass transfer processes. The mathematical model of drying of dispersed agricultural material in the work is presented in the form of a system of differential equations in partial derivatives in which the variable of the determining parameters of the drying process in time and space is reflected, taking into account the daily change in the intensity of heating of the drying agent in the solar collector.*

*The purpose of the research was to determine the dynamics of the development of interconnected non-stationary fields of temperature and moisture content of the material and of the drying agent on the basis of mathematical models of heat and mass transfer processes in the layer of disperse material during convective heat transfer.*

*The implementation of this mathematical model in a standard mathematical package allows to analyze the performance of equipment, in particular heliocollectors, for convective drying of dispersed agricultural materials in a dense layer, depending on the parameters of the material being fed to drying, the intensity of the solar radiation and the efficiency of its perception, the daily oscillations of the temperature of the atmospheric air.*

**Key words:** *heat and mass exchange, mathematical model, solar collector, solar energy*