

facilities management, reduce the payback time technology by 2-3 times compared to existing ones. Analyzed global trends in alternative energy, given the possibility of the use of biological resources in agriculture to generate electricity conducted national study potential alternative renewable energy.

Keywords: *alternative energy, efficiency, grain drying complex, energy, rationality*

УДК 631.362.3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В ОБЕРТАЛЬНОМУ БАРАБАНІ ЗА КОМБІНОВАНОГО ПІДВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Р. А. КАЛІНІЧЕНКО, кандидат технічних наук, доцент кафедри...

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Б. І. КОТОВ., доктор технічних наук, професор

Вінницький національний аграрний університет України

А. В. СПІРІН, кандидат технічних наук, доцент

Вінницький національний аграрний університет України

E-mail: rkalinichenko@ukr.net

Анотація. Зберігання у сухому стані – найбільш розповсюджений спосіб консервування рослинних матеріалів. Енерговитрати на сушіння зернових, насіннєвих і кормових матеріалів можуть складати до 50 % від сумарних затрат на виробництво готового продукту. Універсальні сушарки барабанного типу широко використовуються в господарствах, оскільки, дозволяють проводити зневоднення різних сипучих вологих матеріалів, але за цілим рядом показників роботи (питомі затрати енергії, рівень автоматизації, виконання екологічних вимог, та інші) ці сушарки не зовсім відповідають сучасним вимогам виробництва сільськогосподарської і переробної галузей. Вирішення задач оптимізації щодо продуктивності і енергозатрат барабанних агрегатів можливе лише за наявності адекватної математичної моделі процесів. Тому метою досліджень було вдосконалення математичного опису процесів тепло- і масообміну в процесі сушіння матеріалу в обертовому барабані за наявності джерел ІЧ-випромінювання. За результатами аналізу аналітичних математичних моделей теорії тепло- і масообміну отримано математичний опис динамічних режимів зневоднення сипкого матеріалу в обертовому барабані з комбінованим конвективно-радіаційним підведенням енергії до матеріалу за врахування розподіленості параметрів процесу за довжиною барабану. Отримані рівняння

можна використовувати для аналізу процесу і оптимізації режимних параметрів за відомих значень конструктивних параметрів.

Ключові слова: *математична модель, барабан, ІЧ-випромінювач, сушильний агент, вологий матеріал*

Актуальність. Сушіння є індустріальним способом сухого консервування вологих рослинних матеріалів і продуктів і у відношенні до об'ємів висушування зернових, насіннєвих і кормових матеріалів складає суттєву долю у виробничих галузях АПК. Для висушування такого різноманіття сільськогосподарської сировини в натуральному або подрібненому (для надання сипкості) вигляді широко використовують найбільш універсальні сушильні агрегати барабанного і пневмобарабанного типу. В агрегатах останнього типу матеріал в процесі пересипання за обертання барабану переміщується під дією сушильного агента. Вітчизняна промисловість і закордонні виробники для потреб сільського господарства виробляє значну кількість моделей сушарок такого типу. Але за цілим рядом показників роботи (питомі затрати енергії, рівень автоматизації, виконання екологічних вимог, та інші) ці сушарки не зовсім відповідають сучасним вимогам виробництва сільськогосподарської і переробної галузей.

Значні витрати енергії на випаровування вологи з матеріалу зумовлені значними витратами теплоти в оточуюче середовище, а саме витратами теплоти з відпрацьованим сушильним агентом і теплопередачею через поверхню барабану в оточуюче середовище. Радикальним способом зниження цих видів втрат енергії є зменшення загальної кількості сушильного агента, що може бути досягнуто підведенням додаткової енергії безпосередньо в зону сушіння через спеціальні нагрівальні елементи – інфрачервоні випромінювачі. Але застосування такого способу організації процесу сушіння стримується відсутністю розрахункових математичних моделей тепло- і масообміну в процесі сушіння в барабанних агрегатах за наявності додаткових джерел ІЧ-випромінювання в локальних зонах сушарки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих публікаціях достатньо матеріалів щодо розрахунку процесів тепло- і масообміну [1] та переміщення матеріалу [2] в установках барабанного типу за сушіння сільськогосподарських і харчових матеріалів. Обґрунтовано ефективність застосування терморадіаційного енергопідведення [3] в сушильних барабанах. Основною перевагою таких схем сушильного процесу є більш ефективна передача теплової енергії до матеріалу і можливість впливати на характер розподілу температури матеріалу за довжиною барабану. Однак у відомих роботах вплив локального ІЧ-підведення до матеріалу за одночасного впливу рухомого сушильного агента не розглядається, а математичний опис таких процесів відсутній.

Мета дослідження – вдосконалення математичного опису процесів тепло- і масообміну в процесі сушіння матеріалу в обертовому барабані за наявності джерел ІЧ-випромінювання.

Матеріали і методи досліджень. Специфіка досліджуваного питання зумовлює доцільність використання в якості основного аналітично-розрахункового методу дослідження процесів тепло- і масообміну за сушіння дисперсного матеріалу в барабанних агрегатах. Оскільки математичний опис застосовується для визначення раціональних режимів роботи сушарки в стаціонарному і перехідному (динаміка виходу на сталий режим) процесах, вважатимемо, що досліджується конкретний барабан з комбінованою лопатевою і розподільною насадкою з відомими геометричними параметрами. Задача досліджень при цьому полягає у визначенні впливу потужності і її розподілу на процеси нагріву і зневоднення матеріалу. Враховуючи прямооточний рух сушильного агента і матеріалу гідравлічна схема роботи агрегату відповідатиме моделі ідеального витіснення.

Результати дослідження та їх обговорення. Для складання математичного опису зробимо відповідні припущення, що спростують схему процесу, але не спотворюють фізичну сутність явищ: теплофізичні властивості переміщуваних середовищ та елементів конструкції барабана постійні, теплопровідність за радіусом і довжиною не враховуємо; тепловиділення випромінюючого елемента сконцентровано в одній внутрішній ємності; усі види теплообміну враховуються коефіцієнтами тепловіддачі, що не залежать від температури; нагрівання матеріалу і конструкцій безградієнтне; розподіл параметрів процесу одномірний в напрямку руху матеріалу і сушильного агента (OY).

З урахуванням зроблених припущень математична модель процесу сушіння матеріалу в барабанному агрегаті для зони розташування ІЧ-випромінювача в загальному випадку описується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних п'ятого порядку для чотирьох теплоінерційних ємностей (матеріал, випромінювач, барабан, сушильний агент) і масоємності матеріалу за таких початкових умов:

$$\tau = 0; t = t_0; \theta = \theta_0; U = U_0 \quad ; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial U}{\partial \tau} = 0 \quad \text{і} \quad \text{граничних умов:}$$

$$y = 0; t = t_1 = t_0; \theta = \theta_1 = \theta_0; \quad \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial y} = 0;$$

$$Lm_z c_z \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - Lm_0 r_0 \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial U}{\partial y} \right) = \alpha_k f_z \theta - \theta + \varepsilon \sigma \cdot f_w T_w^4 - T_z^4 + \alpha_{k-w} f_b \theta_b - \theta; \quad (1)$$

$$P = m_w c_w \frac{\partial \theta_w}{\partial \tau} + \varepsilon \sigma \cdot f_w' A_w T_w^4 - T_z^4 + \alpha_k f_w \theta_w - t + \alpha_w f_b'' \theta_w - \theta_b; \quad (2)$$

$$m_b c_b \frac{\partial \theta_b}{\partial \tau} = \alpha_b f_b \theta_w - \theta_b + \alpha_k f_b \theta_z - \theta_b; \quad (3)$$

$$Lm_p c_p \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + v_p \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \alpha_k f_z \theta - t + \alpha_k f_b \theta_b - t + \alpha_k f_w'' \theta_w - t; \quad (4)$$

$$Lm_0 \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial U}{\partial y} \right) = k(t) U - U_p; \quad (5)$$

де $t, \theta, \theta_w, \theta_b$ – відповідно температури сушильного агента (повітря), матеріалу, випромінювача, барабану;

U, U_p – вологовміст матеріалу поточний і рівноважний;

$T = 273 + \theta$ – абсолютна температура;

P – потужність випромінювача;

A – коефіцієнт поглинання матеріалу;

ε – ступінь чорноти випромінювального тіла (випромінювача);

σ – стала Стефана-Больцмана;

f_z, f_b, f_w – поверхні матеріалу, барабану і випромінювача;

m_z, m_w, m_b, m_p – маси матеріалу, випромінювача, барабану, повітря;

α – коефіцієнт теплообміну (k – конвективного, w – радіаційного);

$k(t)$ – коефіцієнт сушіння;

v_p, v_z – швидкості переміщення сушильного агента (повітря) і матеріалу.

За використання зонального опромінення матеріалу, коли ІЧ-випромінювач розміщений в барабані у певній зоні (зона I – рис.1) необхідно мати також математичний опис процесу сушіння в барабані у разі відсутності випромінювача і наявності насадки (зона II – рис.1).

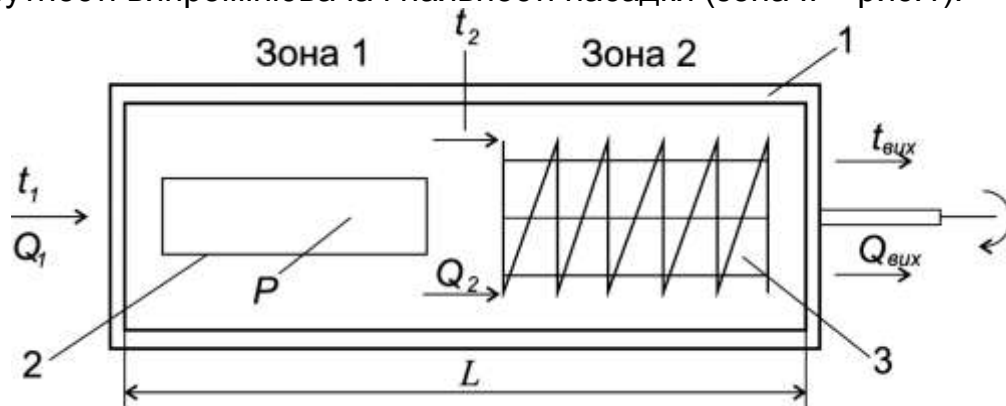


Рис.1. Схема барабанної сушарки (1 – барабан, 2 – ІЧ-випромінювач, 3 – насадка)

Для другої зони сушильного барабану математична модель може бути представлена системою диференціальних рівнянь четвертого порядку для чотирьох теплоінерційних ємностей (сушильного агента, матеріалу, насадки, корпусу барабану):

$$Lm'_a c_p \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + v_p \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \alpha f' \theta - t + \alpha f'_{n-b} \theta_n - t + \alpha f'_b \theta_b - t \quad (6)$$

$$Lm'_z c_z \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = \alpha f' \theta - \theta + Lm_0 r \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \alpha_n f'_n \theta_n - \theta \quad (7)$$

$$m_n c_n \frac{\partial \theta_n}{\partial \tau} = \alpha f'_n \theta - \theta_n + \alpha f'_n \theta_z - \theta_n \quad (8)$$

$$m'_b c'_b \frac{\partial \theta_b}{\partial \tau} = \alpha f'_b \theta - \theta_b + \alpha f'_b \theta_z - \theta_b \quad (9)$$

де m_n, c_n, f_n – маса, питома теплоємність і поверхня теплообміну насадки;

θ_n – температура насадки,

t_z – температура зовнішнього середовища; (позначка ' вказує на належність до другої зони барабана.

Отримані системи рівнянь описують процеси сушіння матеріалу в барабанному агрегаті і можуть бути розв'язані числовими методами на ЕОМ.

Для спрощеного аналізу впливу режимних параметрів на процес зміни вологості і температури матеріалу можна використати наближений метод [4]. В установленому режимі усі параметри процесу в будь-який момент часу будуть однаково розподілені за координатою, тобто $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial U}{\partial \tau} = 0$, що дає можливість визначити статичні характеристики сушарки $\theta(y)$, $t(y)$, $U(y)$ за лінеаризації радіаційних членів рівнянь, а саме заміною [5]:

$$\varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) = \alpha_e (\theta_1 - \theta_2) \quad (10)$$

де $\alpha_e = c_{np} \cdot 10^{-8} (T_1^2 + T_2^2)(\theta_1 + \theta_2)$;

c_{np} – приведений коефіцієнт випромінювання.

Врахувавши (10) можна отримати аналітичний розв'язок системи рівнянь для сталого режиму.

Динаміку процесу – перехідний режим можна визначити замінивши градієнти $\frac{\partial t}{\partial y}, \frac{\partial \theta}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial y}$ похідними від отриманих розв'язків θ', t', U' .

Висновки і перспективи. Отримано математичний опис динамічних режимів сипкого матеріалу в обертальному барабані з комбінованим конвективно-радіаційним підведенням енергії до матеріалу за врахування розподіленості параметрів процесу за довжиною барабану.

Отримані рівняння можна використовувати для аналізу процесу і оптимізації режимних параметрів у разі відомих значень конструктивних параметрів.

Список використаних джерел

1. Антипов, С. Т. Тепло- и массообмен при сушке в аппаратах с вращающимся барабаном / С. Т. Антипов, В. Я. Валуйский, В. И. Меснянкин. – Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2001. – 308 с.
2. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.
3. Незведська, І. В. Обґрунтування параметрів сушильних барабанів з терморадіаційним енергопідведенням сушильного агента при сушінні коренів цикорію / І. В. Незведська. // Сучасні проблеми збалансованого природокористування: матеріали V-міжнародної наук.-практ. конф ... ПДАТУ. Кам'янець-Подільський. – 2010. – С. 170–172.

4. Котов, Б. І. Врахування розподіленості параметрів при моделюванні динамічних режимів сушарок сільськогосподарських матеріалів / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, В. О. Швидя. // Сільськогосподарські машини. – 2016. – №34. – С. 74–80.

5. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.

References

1. Antipov, S. T., Valuyskiy, V.Y a., Mesnyankin, V. I. (2001). Teplo- i massoobmen pri sushke v apparatakh s vrashchayushchimsya barabanom [Heat and mass transfer in the drying apparatus with a rotary drum]. Voronezh: Voronezh. gos. tekhnol. akad., 308.

2. Pershin, V. F., Odnol'ko, V. G. (2009). Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa [Processing of bulk materials in drum-type machines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 220.

3. Nezvedska, I. V. (2010). Obgruntuvannia parametriv sushylnykh barabaniv z termoradiatsiynym enerhopidvedenniam sushylnoho ahenta pry sushinni koreniv tsykoriiu [Substantiation of parameters of drying drums termoradiatsiynym enerhopidvedenniam drying agent drying chicory roots]. Materialy V-mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Suchasni problemy zbalansovanoho pryrodokorystuvannia» PDATU. Kam'ianets-Podilskyi, 170–172.

4. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O. (2016). Vrakhuvannia rozpodilenosti parametriv pry modeliuvanni dynamichnykh rezhymiv susharok silskohospodarskykh materialiv [Consideration distributions parameters in the simulation of dynamic modes dryers agricultural materials]. Silskohospodarski mashyny, 34, 74–80.

5. Ginzburg, A. S., (1973) Osnovy teorii i tekhniki sushki pishchevykh produktov [Fundamentals of the theory and technology of food drying]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 528.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ БАРАБАНЕ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ПОДВОДЕ ЭНЕРГИИ

Р. А. Калиниченко, Б. И. Котов, А. В. Спирин

Аннотация. *Хранение в сухом состоянии – наиболее распространенный способ консервирования растительных материалов. Энергозатраты на сушку зерновых, семенных и кормовых растительных материалов могут составлять до 50% от суммарных затрат на производство готового продукта. Универсальные сушилки барабанного типа широко используются в хозяйствах, поскольку позволяют проводить обезвоживания различных сыпучих влажных материалов, но по целому ряду показателей работы (удельные затраты энергии, уровень автоматизации, выполнения экологических требований, и другие) эти сушилки не совсем соответствуют современным требованиям производства сельскохозяйственной и перерабатывающей отраслей. Решение задач оптимизации по производительности и энергозатратам барабанных*

агрегатов возможно только при наличии адекватной математической модели процессов, поэтому целью исследований было совершенствование математического описания процессов тепло- и массообмена в процессе сушки материала во вращающемся барабане при наличии источников ИК-излучения. По результатам анализа аналитических математических моделей теории тепло- и массообмена получено математическое описание динамических режимов обезвоживания сыпучего материала во вращающемся барабане с комбинированным конвективно-радиационным подводом энергии к материалу с учетом распределенности параметров процесса по длине барабана. Полученные уравнения можно использовать для анализа процесса и оптимизации режимных параметров при известных значениях конструктивных параметров.

Ключевые слова: математическая модель, барабан, ИК-излучатель, сушильный агент, влажный материал

MATHEMATICAL MODEL OF PLANT RAW MATERIALS DRYING IN A ROTATING DRUM WITH THE COMBINED ENERGY SUPPLY

R. A. Kalinichenko, B. I. Kotov, A. V. Spirin

Abstract. Storage in dry most common method of preserving plant material. Energy consumption for drying grain, seed and feed material can comprise up to 50% of the total cost of production of the finished product. Universal dryer drum widely used as farms because allow dewatering of various loose moist materials, but for a number of performance indicators (unit cost of energy, the level of automation, the implementation of environmental requirements, etc.), these dryers do not completely meet the current requirements of agricultural and processing industries. Solving optimization problems on performance and energy consumption drum units is possible only if adequate mathematical models of processes because the purpose of research was to improve the mathematical description of heat and mass transfer during drying material in a rotating drum in the presence of sources of infrared radiation. The analysis of analytical mathematical models of thermal mass transfer theory received mathematical description of dynamic modes dewatering bulk material in the rotary drum with combined convection-radiation energy to supply material distribution taking into account parameters of the length of the drum. The equations can be used for process analysis and optimization of operating parameters with known values of design parameters.

Keywords: mathematical model, drum, IR emitter, drying agent, wet material