

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАРАБАННОЇ СУШАРКИ КОМПЛЕКСУ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИЦІЙНОГО БІОПАЛИВА

Корінчук Д. М., канд. техн. наук, старший науковий співробітник
Снесзкін Ю.Ф., д-р техн. наук, професор, Бунецький В. О.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Анотація. Стаття присвячена розробці енергоефективних режимів сушіння композиційних сумішей біомаси в барабанній сушарці комплексу виробництва композиційного біопалива.

Теоретично отримані залежності питомих показників продуктивності і енерговитрат процесу при змінних вихідних параметрах біомаси за початковою вологістю та дисперсним складом. Проведено аналіз впливу температурної інтенсифікації процесу сушіння, зміни швидкості обертання барабана і динамічного регулювання кута нахилу в діапазоні $-3^\circ < \beta < 3^\circ$.

Встановлено, що температурна інтенсифікація процесу при суміщенні з регулюванням дисперсного складу сировини не забезпечує номінальну продуктивність барабанної сушарки в граничних випадках відхилення початкової вологості сировини. Поєднання динамічного регулювання кута нахилу в досліджуваному діапазоні і дисперсного складу сировини забезпечує при мінімальних енерговитратах на процес сушіння найбільш широкий діапазон регулювання питомої продуктивності сушарки. Встановлено, що методи динамічного регулювання кута нахилу барабана з регулюванням числа обертів або температурного режиму сушіння забезпечують розширення діапазону регулювання продуктивності барабанної сушарки в межах 30-85 кг вип. вол./м³ при зменшенні енерговитрат на 10-15% в порівнянні з існуючими технологіями.

Ключові слова: біомаса, композиційне біопаливо, барабанна сушарка, енергоефективний режим.

JUSTIFICATION ENERGY-EFFICIENT MODES OF DRUM DRYER OPERATION IN PRODUCTION OF COMPOSITE BIOFUELS

Korinchuk D. N., Sneszkin Yu.F, Bunetskiy V. A.
Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. The article is dedicated to the development of energy-efficient modes of drying composite biomass mixtures in a drum dryer of a complex for composite biofuel production.

The aim of the work is theoretical substantiation of energy-efficient modes and measures for controlling the productivity of the drum dryer of the complex for granular biofuels production under variable humidity and disperse composition parameters of the initial mixture.

The analysis of mathematical models of drying of disperse materials in a drum dryer is carried out. The application of a semiempirical model based on the kinetic equation of drying for analyzing the modes of drum dryer operation is substantiated. The specific productivity of evaporating the moisture per volume unit of drum is used as a productivity criterion. The energy consumption per kilogram of evaporated moisture is used as an energy efficiency criterion. The calculation method is proposed.

The dependences of specific indicators of productivity and energy consumption of the process at variable initial humidity and disperse composition parameters of biomass are theoretically obtained. The analysis of influence of temperature intensification of drying process, change of speed of a drum rotation and dynamic adjustment of an angle of inclination in the range $-3^\circ < \beta < 3^\circ$ is carried out.

It has been established that the temperature intensification of the process when combined with the regulation of the disperse composition of the raw material does not ensure the nominal productivity of the drum dryer for extreme deviation of the initial moisture content of the raw material. The necessity of development methods for expansion of the regulation range is substantiated.

It has been established that the combination of dynamic adjustment of the angle of inclination in the investigated range and regulation of the disperse composition ensures, with minimum energy consumption for the drying process, the widest range of regulation of the specific productivity of the drum, which is 70 kg / m³. The method can be implemented with involvement of additional crushing equipment or by regulation of the component and fractional composition of the biomass composite mixture. It has been established that the

methods of dynamic adjustment of the angle of inclination of the drum with regulation of the rotation number or the temperature regime of the drying provide an expansion of the range of the regulation of the drum dryer productivity in the range of 30-85 kg of evaporated moisture per m³ with a 10-15% reduction of energy consumption in comparison with existing technologies.

Key words: biomass, composite biofuel, drum dryer, energy-efficient mode.

Постановка проблеми. Виробництво гранульовано біопалива з залишків біомаси рослинного та деревинного походження набуває в Україні стрімкого розвитку[1]. Основними технологічними операціями виробництва гранульованого біопалива є подрібнення, сушіння та гранулювання біомаси. Одним з найбільш енергоємних технологічних процесів в виробництві гранульованого біопалива є процес сушіння, який реалізується в апаратах барабанного типу. На процеси сушіння в технологічних лініях виробництва твердого біопалива припадає близько 30–40 % загальних енергозатрат, а в випадках висушування сировини високого вологовмісту – до 70 % [2]. На процес сушіння витрачається до 20 % біопалива, що виробляється на підприємстві. В більшості технологічних ліній саме стадія сушіння визначає продуктивність всієї лінії. Барабанні сушарки досить добре зарекомендували себе при сушінні сировини з постійними параметрами вологості на вході та незначних коливаннях дисперсного складу, але, оскільки, основний період роботи лінії виробництва біопалива припадає на осінь, зиму та весну, для біомаси властиві суттєві коливання вологості, що, в свою чергу, впливає на процеси подрібнення та дисперсний склад сировини [3]. Диверсифікація сировинної бази біопаливних підприємств дозволяє орієнтуватися на дешеві доступні види або композиції різних видів біомаси але потребує постійного контролю змінних властивостей сировини. Сукупний вплив дисперсного складу та вологості призводить до коливання продуктивності сушарки. Для правильного ведення технологічного процесу та підтримання постійної продуктивності в агрегаті застосовують регулювання температури сушильного агенту шляхом збільшення витрати палива та безступінчасте регулювання швидкості барабана в межах від 2 до 10 об/хв, що встановлюється оператором лінії сушіння вручну за допомогою варіатора [4]. При цьому енергоефективний режим сушіння сировини вибирається покладаючись тільки на кваліфікацію та досвід оператора. Тому якість отриманого матеріалу напряму залежить від людського фактору. Коливання продуктивності лінії призводять до порушень технологічного процесу та підвищення собівартості палива, особливо в зимовий період, та роблять виробництво в цей період нерентабельним.

Одним із методів забезпечення низької собівартості продукції є розробка енергоефективних заходів регулювання продуктивності сушарки та скорочення енерговитрат на виробництво. Проблема оцінки роботи існуючого обладнання та вибору режиму сушіння, що забезпечує підвищення ефективності використання сушильної установки, є для сьогодні актуальною задачею.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування енергоефективних режимів та заходів регулювання продуктивності барабанної сушарки комплексу виробництва гранульованого біопалива при змінних параметрах вихідної суміші за вологістю та дисперсним складом.

Аналіз попередніх досліджень. Вирішення поставленої в роботі мети потребує вибору та обґрунтування теоретичної моделі процесу сушіння. Фізико-математичне моделювання процесу сушіння в барабанних сушарках представлено в роботах Miskell & Marshall(1956), Hirose & Shinohara (1982), Hallström (1985), Kamke & Wilson (1986), Kelly (1995), Sherritt (1993), Juuso et al. (1998), Koskinen (1998), Duchesne (1996). Модель сушильної барабанної установки в загальному вигляді складається з двох допоміжних моделей, з яких одна є детальним описом поведінки твердого матеріалу, а інша враховує конструкцію барабану. Переважна кількість досліджень сконцентровані на вдосконаленні залежностей, які виражають час перебування та розподіл матеріалу в барабані, що визначає ефективність спрацьовування сушильного агенту та продуктивність сушарки. Дослідження дають можливість визначити час перебування матеріалу в сушарці, загальне теплове навантаження, а також їх співвідношення залежно від розмірів барабана та умов процесу сушіння, але більшість співвідношень є напівемпіричними та пов'язані з конкретними конструктивними рішеннями. Аналіз узагальнених сучасних моделей проведений в роботах [5, 6] виявив розбіжності за параметром часу перебування часток в сушарці майже на порядок. В роботах зазначено, що навіть, незважаючи на численні теоретичні та експериментальні формули, отримані за останній час, немає існуючої прийнятної універсальної моделі, яка б сполучала одночасно і конструкційні параметри і параметри процесу. Наявні на даному етапі співвідношення дозволяють лише якісно оцінити розглянуті параметри. Залежності тепломасопереносу в технологіях сушіння подрібненої біомаси, які наводяться в літературі та використовуються в практиці внаслідок значної ідеалізації математичного апарату, припущень та спрощень в більшості випадків не є достатньо адекватними реальним процесам [9]. Визначення кінетичних та енергетичних показників процесу сушіння все ще базується на багаторічному досвіді користувачів окремого обладнання. Таким чином, треба орієнтуватися на вибір прийнятної математичної моделі наближеної емпіричною складовою до досліджуваного матеріалу та процесу, найбільш загальною

та не надто складною для вирішення. Математична модель на базі кінетичного рівняння сушіння дисперсних матеріалів в барабанній сушарці, висунута в роботі [8] та розвинена в дослідженнях ЦНДІФ та інших дослідників [9–12] цілком задовольняє поставленим вимогам та може бути використана для дослідження та розробки енергоефективних режимів та заходів регулювання продуктивності барабанної сушарки комплексу виробництва композиційного біопалива при змінних параметрах вихідної суміші.

Основний матеріал. Напівемпірична модель [9] включає наступні кінетичні рівняння (1–4) сушіння подрібненої біомаси в барабанній сушарці:

$$G = M \cdot \sqrt{\frac{t_k - 30}{t_{noch} - t_k + 10}} \cdot (\rho v) D^2 t_{noch}^{0,425} \quad (1)$$

$$M = \frac{1360 \cdot \psi^{0,39,0,39} \left(\frac{W_k}{W_{noch}(W_{noch} - W_k)} \right)^{0,34} \left(\frac{n^2}{1800} \right)^a D^n \sin \beta^b}{A^{0,34} d_{сер}^{0,526} (\rho v)^{0,136}} \quad (2)$$

де G – продуктивність апарату за сухим матеріалом, кг/год; t_{noch}, t_k – температура сушильного агента на вході та виході з апарату відповідно, °С; ρv – масова швидкість сушильного агента, кг/(м²·с); ρ – густина сушильного агента, кг/м³; v – швидкість сушильного агента, м/с; D – внутрішній діаметр апарату, м; ψ – коефіцієнт заповнення апарату, %; l – довжина барабану, $\varphi_{noch}, \varphi_k$ – початкова та кінцева вологість біомаси, %; n – частота обертів барабану, об/хв.; β – кут нахилу барабану, град; $d_{сер}$ – середній розмір часток сировини, який визначається за результатами ситового аналізу, мм.

Час перебування часток заданого фракційного складу в сушильному барабані τ , хв., визначається за залежністю (5):

$$\tau = 47,1 \cdot D^2 \cdot \psi \cdot l \cdot G \quad (3)$$

Температура відпрацьованого сушильного агента визначається в результаті спільного розв'язанням рівняння (6) та рівняння (1, 2) методом послідовних ітерацій:

$$\frac{t_{noch} - t_k}{M \cdot t_{noch}^{0,425} \sqrt{\frac{t_k - 30}{t_{noch} - t_k + 10}}} = 0,713 \frac{W_{noch} - W_k}{100} + 0,00038 C_m (t_k - 30) \frac{W_{noch} - 100}{100} \quad (4)$$

де C_m – теплоємність матеріалу при середніх значеннях його температури та вологості, кДж/кг·°С.

В роботі [9] наводяться залежності для визначення коефіцієнтів a, a_1, b , отримані на основі досліджень ЦНДІФ процесу сушіння подрібненої деревини. З достатнім наближенням ці залежності можуть бути використані для розрахунку процесу сушіння композиційних сумішей подрібненої біомаси.

Критерієм енергетичної ефективності режиму сушіння прийнято питомі витрати теплоти на кілограм випареної вологи Q_{num} , (7):

$$Q_{num} = 1,05 \cdot (Q_{mat} + Q_{суш} + Q_2) / G_{вол} \quad (5)$$

де Q_{mat} – втрати теплоти з висушеним матеріалом; кДж/год; $Q_{суш}$ – кількість теплоти на випарювання вологи, кДж/год; Q_2 – втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом, кДж/год; $G_{вол}$ – кількість випареної вологи, кг/год. Втрати через огорожуючі конструкції приймалися в розмірі 5% витрат на процес. Складові енергетичних витрат на процес сушіння розраховані за рівняннями (6–8):

$$Q_{mat} = G \cdot \frac{100 + W_k}{100} C_m \cdot (T_k - 30) \quad (6)$$

$$Q_{суш} = 900 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot v \cdot C_z (T_k - T_0) \quad (7)$$

$$Q_2 = \frac{W_{noch} - W_k}{100} G \cdot (2480 - 1,85 T_k) \quad (8)$$

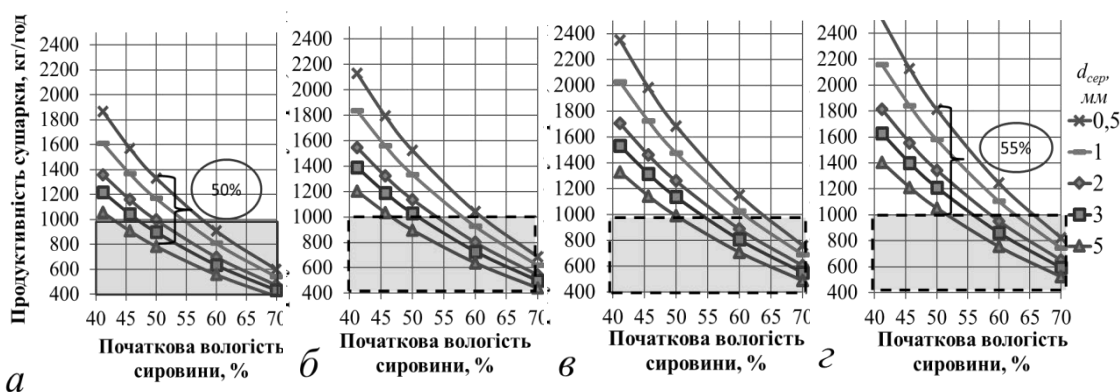
Критерієм інтенсивності процесу прийнято питому продуктивність за випареною вологою з одиниці об'єму барабана q_{num} , кДж/м³:

$$q_{num} = 1,27 \cdot G_{вол} / (D^2 l) \quad (9)$$

Розв'язання системи рівнянь (1–9) при змінних початкових параметрах вологості та середнього розміру композиційної суміші дозволило за умови постійної вологості кінцевого матеріалу на рівні 10 % отримати комплекс даних, що характеризують процес сушіння композиційної суміші біомаси деревинного та рослинного походження.

Більшість ліній виробництва біопалива обладнані сушарками комплексу виробництва трав'яного борошна типу АБМ–1,5 та їх модифікаціями з продуктивністю G на рівні 1 т/год, для яких характерні габаритні розміри барабану: діаметр $D = 1,2\text{--}1,6$ м, довжина $L = 8\text{--}12$ м. Аналіз проведено для сушарки комплексу СК–3 продуктивністю 1 т/год., виготовленій за проектною документацією компанії ТОВ «БМ–Інжиніринг» на виробничих потужностях ТОВ «ПРОГРЕС» м. Запоріжжя, на замовлення ТОВ «АЛЬФА–ЛАЙН», м. Новоград–Волинський. Сушарка має наступні конструкційні розміри: робочий діаметр барабану $D = 1,7$ м, довжина $L = 11$ м, лопатеві розподілюючі пристрої – 36 шт.

Теоретично досліджено вплив початкової вологості сировини та середнього дисперсного складу на продуктивність барабанної сушарки СК–3, встановлену з додатним кутом нахилу 3° , кількість обертів становила 4 об./хв., температура сушильного агенту на вході в сушарку становила 250°C . Результати розрахунків представлені на діаграмі (рис. 1, а). Як видно, збільшення вологості сировини з середнім розміром фракції 2 мм з 50 до 70% призводить до зменшення продуктивності барабанної сушарки за кінцевим продуктом майже в 2 рази, а коливання фракційного складу одного порядку до зміни продуктивності в межах 50%. Зменшення дисперсного складу на порядок дозволяє підвищити ефективність спрацювання сушильного агенту та підвищити продуктивність барабанної сушарки майже на 50%. Цей метод інтенсифікації потребує в технологічній лінії можливості регулювання дисперсного складу шляхом регулювання ступеня подрібнення. Метод може бути реалізований залученням додаткового подрібнюючого обладнання або регулюванням фракційного та компонентного складу композиційної суміші. При вологості сировини більше 57% даний метод не дозволяє досягнути рівня продуктивності за сухим продуктом 1 т/год.



а – температура сушильного агенту $T_{\text{поч}} = 250^\circ\text{C}$; б – температура сушильного агенту $T_{\text{поч}} = 300^\circ\text{C}$; в – температура сушильного агенту $T_{\text{поч}} = 350^\circ\text{C}$; з – температура сушильного агенту $T_{\text{поч}} = 400^\circ\text{C}$

Рис. 1. Вплив початкової температури сушильного агенту на продуктивність барабанної сушарки за змінних вхідних параметрів композиційної суміші біомаси в діапазоні вологості сировини 40 – 70%, середнього розміру суміші 0,5–5 мм.

Температурна інтенсифікація не в повній мірі може забезпечити вихід апарата на номінальну продуктивність 1 т/год. Проведено розрахунки для температурного діапазону $250\text{--}400^\circ\text{C}$. Результати розрахунку представлено на (рис. 1, а – 1,г). З рисунків видно, що зі збільшенням температури інтенсивно зростає продуктивність для сировини з вологістю 40 – 55%. Для сировини з вологістю 50% збільшення продуктивності при збільшенні температури та зменшенні дисперсного складу на порядок становить 20% і в межах дисперсного складу 55%, загалом 75%. Середній прогрес підвищення продуктивності за рахунок температурної інтенсифікації становить 15, 10, 6% на кожні 50°C . Суміщення подрібнення сировини та температурної інтенсифікації процесу в межах $220\text{--}300^\circ\text{C}$ дає на даному етапі найбільший ефект підвищення продуктивності. Та навіть при дії суміщеного впливу температури та дисперсного складу на процес сушіння в барабанній сушарці, забезпечити номінальну продуктивність сушарки 1 т/год, як видно з (рис. 1 г), не завжди вдається. Розглядаючи додаткові методи інтенсифікації процесу сушіння слід виходити з того, що в барабанній сушарці має місце два види теплообміну – конвективний та кондуктивний. Як відомо [12] кількість теплоти, що передається конвекцією майже в 20 раз вище. Відповідно основною задачею інтенсифікації є перерозподіл сировини в апараті, що забезпечує збільшення площі контакту між

сировиною та сушильним агентом. Згідно досліджень ЦНДІФ установка барабану з кутом нахилу в сторону завантаження веде до збільшення циклів конвективного сушіння окремих часток сировини, підвищення ступеня заповнення та ефективності спрацьовування сушильного агента, що робить доцільним використання пристроїв динамічного регулювання кута нахилу в технологіях сушіння біомаси в барабанних сушарках.

На базі представленої вище методики проведено аналіз питомої продуктивності сушарки та витрат енергії на кілограм випареної вологи при зміні швидкості обертання барабана, температури сушильного агента в межах 250–400 °С, та дисперсного складу матеріалу спільно з регулюванням кута нахилу барабана в межах $-3^\circ < \beta < 3^\circ$ (рис. 2).

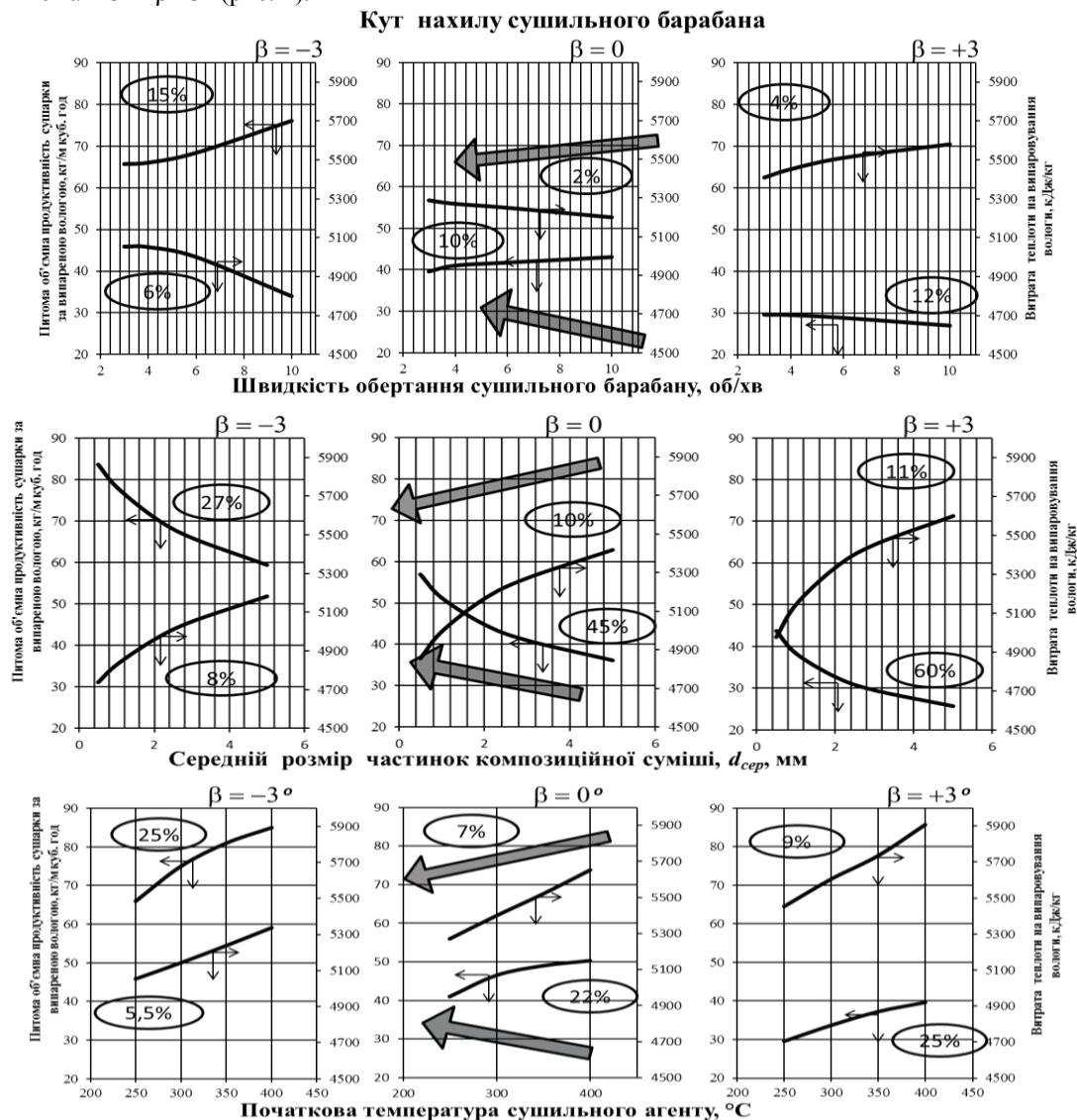


Рис. 2. Вплив кута нахилу сушильного барабана, температури сушильного агента та кількості обертів на продуктивність барабанної сушарки та енерговитрати на процес.

Базовими параметрами процесу прийнято $T_{ноч}=250$ °С, $n=4$ об./хв., $d_{сеп}=2$ мм. При додатному куті нахилу барабанної сушарки збільшення кількості обертів веде до зменшення продуктивності за випареною вологою з $30 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot \text{год.}$ майже до $25 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot \text{год.}$, а витрата теплоти на випаровування вологи зростає з 5300 до 5600 кДж/кг. Зміна дисперсного складу веде до зменшення продуктивності за випареною вологою з $45 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot \text{год.}$ до $15 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot \text{год.}$, витрата теплоти на випаровування вологи зростає з 5000 до 5600 кДж/кг. Збільшення температури сушильного агента веде до підвищення продуктивності за випареною вологою з $30 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot \text{год.}$ до $40 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot \text{год.}$, а витрата теплоти на випаровування вологи зростає з 5400 до 5900 кДж/кг.

Як видно з рис. 2, регулювання кількості обертів суміщене зі зміною кута нахилу з додатного до від'ємного дозволяє підвищити вологопродуктивність в граничних значеннях до $75 \text{ кг/м}^3\cdot\text{год}$. навіть без температурної інтенсифікації. Слід зауважити, що при додатному куті нахилу зі збільшенням кількості обертів продуктивність спадає, в той же час при від'ємному куті нахилу спостерігається зворотнє явище. В останньому випадку це явище пояснюється збільшенням кількості циклів конвективного сушіння окремих часток біомаси, а відповідно ступеня заповнення барабана і часу перебування крупних часток в барабані. Регулювання температури сушильного агента або дисперсного складу суміщене зі зміною кута нахилу з додатного до від'ємного дозволяє підвищити продуктивність в граничних значеннях до $85 \text{ кг/м}^3\cdot\text{год}$. Це явище пояснюється збільшенням часу перебування крупних часток в барабані та виносом сухих та дрібних часток. Тобто можна організувати вибіркоче сушіння вологої сировини суміщене з сепараційним ефектом.

Динамічне регулювання кута нахилу сушарки безпосередньо впливає на збільшення часу перебування часток в апараті, ступеня заповнення сушарки та поверхні контакту між матеріалом та сушильним агентом в одиниці об'єму сушарки. Відповідно зменшується температура відпрацьованого сушильного агента та збільшується ефективність його використання, що приводить до зменшення питомих витрат теплоти на випаровування вологи в межах $4750 - 5000 \text{ кДж/кг}$ за суміщення з регулюванням кількості обертів, в межах $5000 - 5300 \text{ кДж/кг}$ за суміщення з регулюванням температури сушильного агента та $4700 - 5200 \text{ кДж/кг}$ у випадку регулювання дисперсного складу, що відповідає підвищенню енергоефективності установки на $10 - 15$.

Висновки: За результатами досліджень встановлено, що найбільш енергоефективний метод регулювання продуктивності барабанної сушарки комплексу виробництва композиційного біопалива полягає в поєднанні динамічного регулювання кута нахилу барабану в межах $-3^\circ < \beta < 3^\circ$ з контролем та регулюванням дисперсного складу біомаси на вході в сушарку. Метод забезпечує найбільший діапазон регулювання продуктивності сушарки, який становить за випареною вологою $70 \text{ кг/м}^3\cdot\text{год}$ і може бути реалізований залученням додаткового подрібнюючого обладнання або регулюванням компонентного та фракційного складу композиційної суміші біомаси. Це дозволить забезпечити в річному циклі роботи підприємства проектну продуктивність [3].

Не менш ефективними методами, але значно простішими в реалізації є поєднання динамічного регулювання кута нахилу барабана з регулюванням кількості обертів, або температурного режиму сушіння. Запропоновані методи забезпечують розширення діапазону регулювання продуктивності в межах $30-85 \text{ кг вип. вол./ м}^3$ при зменшенні енерговитрат на $10-15\%$ в порівнянні з існуючими технологіями. Результати роботи використані при розробці інноваційного сушильного комплексу СК-3.

Література

1. Гелетуха Г., Крамар В., Епик О. та ін. Комплексний аналіз Українського ринку пелет з біомаси. Київ, 2016. 334 с.
2. Снежкін Ю. Ф., Корінчук Д. М. Безгін М. М., Степчук І. В. Енергетичний аналіз технологій виробництва твердого біопалива // Наукові праці ОНАХТ. 2014 Т45, №3. С. 187-190.
3. Korinchuk D.M. Justification of energy consumption during the comminution stage in the technologies of biofuel production // Scientific Herald of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Technique and energy of APK. 2017. № 268. pp. 90-100.
4. Середин М. Ю. Розробка системи керування швидкісним режимом сушіння в технологічному комплексі виготовлення твердого біопалива // Вісник ХНТУСГ Петра Василенка. 2014. № 153. С. 144-146.
5. Yliniemi, L., Koskinen, J., & Leiviskä, K. Advanced control of a rotary dryer. IFAC Proceedings. 1998. Vol. 31. № 23. p. 119-124.
6. Янюк Ю. В. Математическое моделирование и оптимизация процессов сушки сыпучих материалов в сушильной установке барабанного типа: дис. докт. техн. наук. 05.13.18. захист 27.02.2004 / наук кер. Питухин А. В. Петрозаводск: Петрозавод. гос. ун-т., 2004. 164 с
7. Петровский В. С., Сафонов А.О. Исследование закономерностей удаления влаги из древесных частиц в прямоточных барабанных сушилках // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2002. №6. С. 42-48.
8. McCormick P. Y. Gas velocity effects on heat transfer in direct heat rotary dryers // Chemical Engineering Progress. 1962. – Т. 58. № 6. С. 57-61.
9. Стерлин Д. М. Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит. М.: Лесная промышленность, 1977. – 384 с.
10. Orlova A. A., Korchuk Yu. A. Increase in drying efficiency of crushed wood for pellet production by Ekotoplivo company Systems. Methods. Technologies. 2013. № 4. p. 148-152.
11. Білей П. В., Приставський Б. І. Аналіз ефективності конвективного сушіння деревини // Науковий вісник НЛТУ України. 2012. № 10. С. 116-119.
12. Храмов А. Н., Субботин М. Ю. Повышение эффективности сушки сыпучих материалов за счет интенсификации конвективного теплообмена // Вестник ИГТУ. 2014. № 6. С. 161-165.

References

1. Heletukha, H., Kramar, V., Epik, O., Antoshchuk, T. & Titkov V. (2016). *Kompleksnyy analiz Ukrayinskoho rynku pellet z biomasoy*. Kyiv: PROON "Rozvytok ta komertsializatsiya bioenerhetychnykh tekhnolohiy u unitsypal nomu sektori v Ukrayini". 334. (in Ukrainian)
2. Snyezhkin, Y. F., Korinchuk, D. M. Bezgin, M. M. & Stepchuk I. V. (2014) *Enerhetychnyy analiz tekhnolohiy vyrobnytstva tvrdoho biopalyva. Scientific Works of ONAFT.* (45 (3)), 187-190. (in Ukrainian)

3. Korinchuk, D.M. (2017) Justification of energy consumption during the comminution stage in the technologies of biofuel production. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*, № 268, 90–100. (in Ukrainian)
4. Serebyn, M. Y. (2014) Rozrobka systemy keruvannya shvydkisnym rezhymom sushynnya v tekhnolohichnomu kom-pleksi vyhotovlennya tverdogo biopalyva. *Visnyk KHNTUS Petra Vasylenka*. № 153, 144–146.
5. Yliniemi, L., Koskinen, J., & Leiviskä, K. (1998). Advanced control of a rotary dryer. *IFAC Proceedings*. Vol. 31, № 23, 119–124.
6. Yanyuk, Y. V. (2004) Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya protsessov sushki sypuchikh materialov v sushil'noy ustanovke barabannogo tipa: Doctor's thesis. Petrozavodsk. (in Russian)
7. Petrovskiy, V. S., Safonov A. O. (2002) Issledovaniye zakonomernostey udaleniya vlagi iz drevesnykh chastits v pryamotochnykh barabannykh sushilkakh. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*. №6, 42–48. (in Russian)
8. McCormick, P. Y. (1962) Gas velocity effects on heat transfer in direct heat rotary dryers. *Chemical Engineering Progress*. Vol. 58, №. 6, 57–61.
9. Sterlin, D. M. (1977) *Sushka v proizvodstve fanery i drevesnostruzhechnykh plit*. M.: Lesnaya promyshlennost. 334. (in Russian)
10. Orlova, A. A., Korchuk, Yu. A. (2013) Increase in drying efficiency of crushed wood for pellet production by Ekotoplivo company. *Systems. Methods. Technologies*. № 4. p. 148–152. (in Russian)
11. Biley P. V., Prystavskyy B. I. (2012) Analiz efektyvnosti konvektyvnoho sushynnya derevyny. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy*. № 10, 116–119. (in Ukrainian).
12. Khramov, A. N., Subbotin, M. Y. (2014) Improving bulky material drying efficiency due to convective heat transfer intensification. *Vestnik IGTU*. № 6, 161–165. (in Russian)

Отримано в редакцію 21.04.2018
Прийнято до друку 30.06.2018

Received 21.04.2018
Approved 30.06.2018

УДК 631.17

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1024>

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ІНФРАЧЕРВОНОГО СУШІННЯ ЗЕРНОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВІБРОХВІЛЬОВИМ КОНВЕЄРОМ

Паламарчук І.П. д.т.н., професор¹, Кюрчев С.В. к.т.н., професор²,
Верхоланцева В.О. к.т.н., ст. викладач²

Національний університет біоресурсів та природокористування України, м.Київ¹
Таврійський державний агротехнологічний університет, м.Мелітополь²

Анотація. Проведений аналіз конвеєрних апаратів для забезпечення необхідного вологовидалення сипкої сільськогосподарської сировини дозволив обґрунтувати ефективність вібраційних конвеєрних схем. Класичні віброконвеєрні машини базуються на електромагнітному віброзбудженні та використанні жорсткого вантажонесучого органу, що вимагає значних витрат енергії та матеріалу. Дана проблема вирішується за рахунок використання механічного віброзбудження та недеформувального транспортуючого елемента, що притаманні віброхвильовим конвеєрним апаратам. Представлена принципова схема віброхвильової терморадіаційної сушарки, яка дозволяє ефективно вирішити проблеми достатньо інтенсивної та рівномірної обробки при мінімізації енерго- та матеріаловитрат, помірного термічного навантаження на шари продукції та максимального збереження її вихідних властивостей. На основі експериментальних досліджень розроблено дослідної моделі даної сушарки було складено критеріальне рівняння тепломасобміну, що дозволяє проектувати сушарки із заданими параметрами процесу.

Ключові слова: зберігання, параметри, продукція, зерно, інфрачервоне опромінювання, сушіння, вологість, віброхвильова інфрачервона сушарка.

RATIONALING OF PARAMETERS OF INFRARED DRYING OF GRAIN PRODUCTS WITH VIBROWAVING CONVEYOR

Palamarchuk I.P.¹, Dr. of Tech. Sci., prof., Kiurchev S.V.², PhD, prof., Verkholantseva V.O.², PhD

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

²Tavria State Agrotechnological University, Melitopol

Abstract. The analysis of conveyor devices to ensure the necessary moisture removal of loose agricultural raw materials allowed to substantiate the effectiveness of vibration conveyor circuits. Classic vibroconveyor machines are based on electromagnetic vibroexcitation and the use of a rigid carrier, which requires significant energy and material costs. This problem is solved by the use of mechanical vibration and undetectable transporter element inherent in vibrating conveyor devices. Mechanical vibrators are aggregated in the support bundles of the tape mechanism, providing with sufficiently compact performance of the standing or running