

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

XVII Міжнародної наукової конференції
**«УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І
ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ТА
ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»**

3-8 вересня 2018 р.



**ОДЕСА
2018**

Публікуються доповіді, представлені на XVII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (3 – 8 вересня 2018 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

Доктор техн. наук, професор
Кандидат техн. наук

О.Г. Бурдо
Ю.О. Левтринська

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

Єгоров <i>Богдан Вікторович</i>	– голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
Бурдо <i>Олег Григорович</i>	– вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
Атаманюк <i>Володимир Михайлович</i>	– Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
Васильєв <i>Леонард Леонідович</i>	– Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор
Гавва <i>Олександр Миколайович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Гумницький <i>Ярослав Михайлович</i>	– Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
Долинський <i>Анатолій Андрійович</i>	– Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАН України
Зав’ялов <i>Владимир Леонідович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Сукманов <i>Валерій Олександрович</i>	– Полтавський університет економіки і торгівлі, д.т.н., професор
Колтун <i>Павло Семенович</i>	– Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
Корнієнко <i>Ярослав Микитович</i>	– Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
Малежик <i>Іван Федорович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Михайлов <i>Валерій Михайлович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор
Паламарчук <i>Ігор Павлович</i>	– Національний університет біоресурсів та природокористування України, д.т.н., професор
Снежкін <i>Юрій Федорович</i>	– Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., академік НАН України
Сорока <i>Петро Гнатович</i>	– Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
Тасімов <i>Юрій Миколайович</i>	– Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
Товажнянський <i>Леонід Леонідович</i>	– Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України
Ткаченко <i>Станіслав Йосифович</i>	– Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
Черевко <i>Олександр Іванович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор
Шит <i>Михайл Львович</i>	– Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.
Сухий <i>Константин Михайлович</i>	– ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», д. хім. н., професор

СЕКЦІЯ 3.

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.
РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТА ЕКОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНІ
ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ**

УДК 66.047

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ РОБОТИ БАРАБАННОЇ СУШАРКИ КОМПЛЕКСУ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИЦІЙНОГО БІОПАЛИВА

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

ENERGY EFFICIENT MODES OF THE WORK OF BURABAN COMPUTER COMPONENTS COMPLEX COMPONENTS COMPOSITION BIOPUBLIC COMPONENTS

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

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

Проведено аналіз математичних моделей сушки дисперсних матеріалів в барабанній сушарці. Обґрунтовано застосування для аналізу режимів роботи барабанної сушарки напівемпіричної моделі заснованої на кінетичному рівнянні сушки. В якості критерія продуктивності використано питому продуктивність за випареною вологою з одиниці об'єму барабана. В якості критерія енергоефективності використано енерговитрати на кілограм випареної вологи. Запропоновано розрахункову методику.

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. Обґрунтовано необхідність розробки методів розширення діапазону регулювання.

Встановлено, що поєднання динамічного регулювання кута нахилу в досліджуваному діапазоні і дисперсного складу забезпечує при мінімальних енерговитратах на процес сушіння найбільш широкий діапазон регулювання питомої продуктивності барабана, який становить 70 кг/м^3 . Метод може бути реалізовано залученням додаткового подрібнюючого обладнання або регулюванням компонентного та фракційного складу композиційної суміші біомаси. 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 $30\text{-}85 \text{ кг вип. вол./м}^3$ при зменшенні енерговитрат на $10\text{-}15\%$ в порівнянні з існуючими технологіями.

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 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 / m^3 . 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.

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

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

Постановка проблеми. Виробництво гранульованого біопалива з залишків біомаси рослинного та деревинного походження набуває в Україні стрімкого розвитку. Слід відзначити, що це обумовлено достатньо низькою собівартістю паливних гранул в порівнянні з іншими видами біопалива в сукупності з простотою технології виробництва [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.

До переваг барабанних сушарок біопаливних комплексів в порівнянні з іншими видами сушарок можна віднести універсальність; високу якість сушіння за рахунок інтенсивного змішування матеріалу; можливість сушити високовологий, пористий матеріал; простота монтажу, прийнятна ціна. 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 сировини 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 сьогодення 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. Визначення енергоефективних режимів при змінних параметрах вхідної сировини потребує об'ємних та затратних експериментальних досліджень. Фізико-математичні методи моделювання спрощують пошук раціональних енергоефективних режимів роботи обладнання. 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), Hirosue & 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 формули, що виражає час перебування та розподіл матеріалу в барабані, що визначає ефективність спрацювання 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 – 7] виявив розбіжності за параметром часу перебування часток в сушарці майже на порядок. 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 [9–10] 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:

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

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

де G – продуктивність апарату за сухим матеріалом, кг/год; $t_{ноч}, t_k$ – температура сушильного агента на вході та виході з апарату відповідно, °C; 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, $\varphi_{ноч}, \varphi_k$ – 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:

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

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

В роботі [12] наводяться залежності для визначення коефіцієнтів a, a_1, b , отримані на основі досліджень ЦНДФ 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} :

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

де $Q_{мат}$ – втрати теплоти з висушеним матеріалом; кДж/год; $Q_{суш}$ – кількість теплоти на випарювання вологи, кДж/год; Q_z – втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом, кДж/год; $G_{вол}$ – кількість випареної вологи, кг/год. Втрати через огоджуючі конструкції приймалися в розмірі 5% витрат на процес.

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

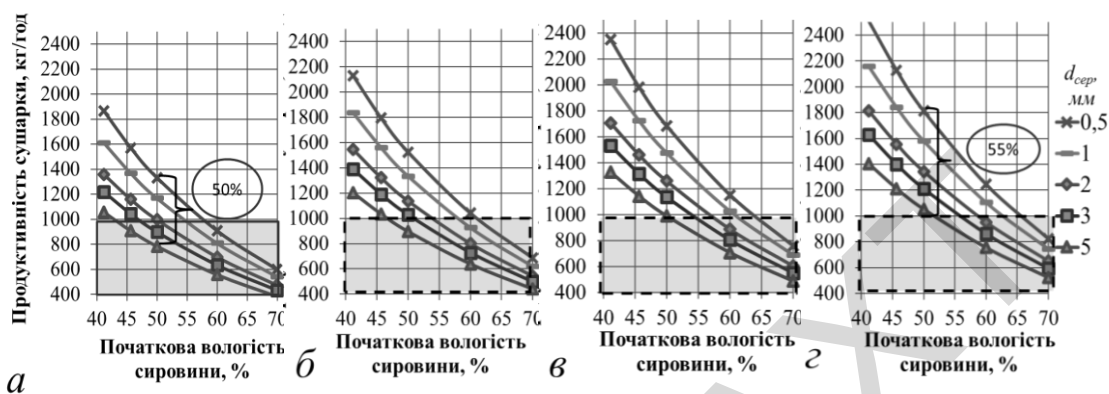
$$q_{num} = 1,27 \cdot G_{вол} / (D^2 l) \quad (6)$$

Розв'язання системи рівнянь (1–6) 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 $D = 1,2–1,6$ м, довжина $L = 8–12$ м. Аналіз проведено для сушарки комплексу СК–3 продуктивністю 1 т/год, виготовленій за проектною документацією компанії ТОВ “БМ–Інжиніринг” на виробничих потужностях ТОВ БМЗ «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 розподіляючі пристрої – 36 шт.

Теоретично досліджено вплив початкової вологості сировини та середнього дисперсного складу на продуктивність барабанної сушарки СК–3, встановлену з додатнім кутом нахилу 3°, кількість обертів становила 4 об./хв., температура сушильного агента 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 спрацьовування сушильного агенту та підвищити продуктивність барабанної сушарки майже на 50%. 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 $T_{\text{поч}}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – температура сушильного агенту $T_{\text{поч}}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$;
в – температура сушильного агенту $T_{\text{поч}}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$; г – температура сушильного агенту $T_{\text{поч}}=400\text{ }^{\circ}\text{C}$

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 – 400°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 – 300°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 [11] 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 агенту в межах 250–400 °C, та дисперсного складу матеріалу спільно з регулюванням кута нахилу барабана в межах $-3 < \beta < 3$ (рис. 2).

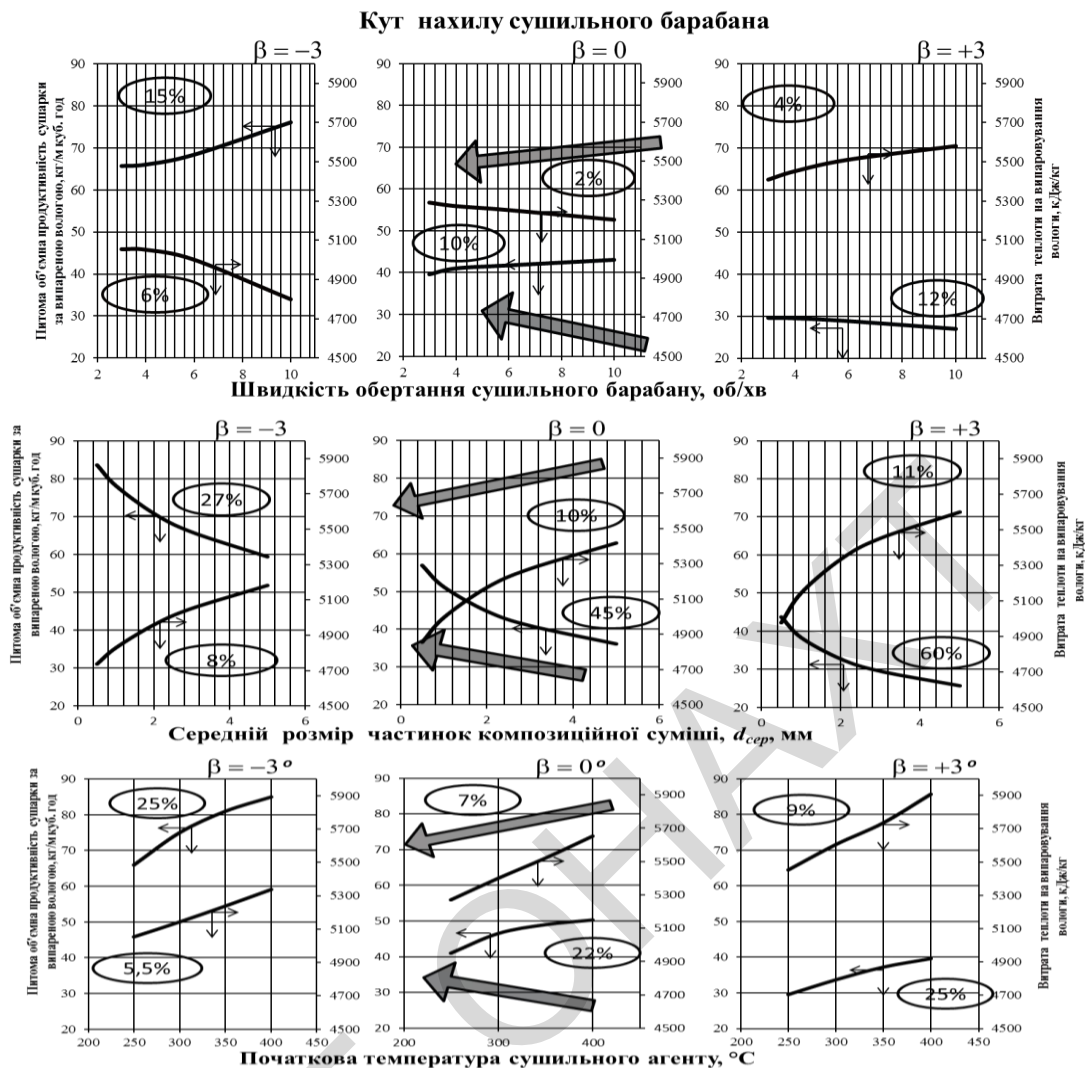


Рис. 2. Вплив кута нахилу сушильного барабана, температури сушильного агенту та кількості обертів на продуктивність барабанної сушарки та енерговитрати на процес.

Базовими параметрами процесу прийнято $T_{поч}=250$ °С, $n=4$ об./хв., $d_{сер}=2$ 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 агенту 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 $75 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot \text{год.}$ 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 зворотне 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 агенту або дисперсного складу суміщене зі зміною кута нахилу з додатного до від'ємного дозволяє підвищити продуктивність в граничних значеннях до $85 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot \text{год.}$ Це явище пояснюється збільшенням часу перебування крупних часток в барабані та виносом сухих та дрібних часток. Тобто можна організувати вибіркове сушіння вологої сировини суміщене з сепараційним ефектом.

Динамічне регулювання кута нахилу барабанної 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 агенту та збільшується ефективність його використання, що приводить до зменшення питомих витрат теплоти на випаровування вологи в межах 4750 – 5000 кДж/кг при суміщенні з регулювання кількості обертів, в межах 5000 – 5300 кДж/кг при суміщенні з регулюванням температури сушильного агенту та 4700 – 5200 кДж/кг у випадку регулювання дисперсного складу що відповідає підвищенню енергоефективності установки на 10 – 15%. Слід зауважити, що при поєднанні динамічного регулювання кута нахилу та дисперсного складу досягається найбільший діапазон регулювання продуктивності сушарки, який становить за випаркою вологою 70 кг/м³-год.

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 випаркою вологою 70 кг/м³-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 барабану з регулюванням кількості обертів, або температурного режиму сушіння. Запропоновані методи забезпечують розширення діапазону регулювання продуктивності в межах 30-85 кг вип. вол./ м³ 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. Байгуреев А. М., Ертаева Ж. А. Математическое моделирование и решение оптимизационной задачи при определении температуры сушильного агента на выходе из сушильного барабана // Успехи современного естествознания. 2015. № 9. С. 482-485.
11. Храмов А. Н., Субботин М. Ю. Повышение эффективности сушки сыпучих материалов за счет интенсификации конвективного теплообмена // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 6. С. 161-165

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКТОРА НАСИЧЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ЦУКАТІВ	
Гузьова І.О., Атаманюк В.М.	78
УНИФИЦІРОВАННИЙ ПОДХОД К МОДЕЛІРОВАНИЮ КАВИТАЦІОННИХ РЕАКТОРОВ	
Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е., Коник А.В., Цельн Б.Я., Гоженко Л.П.	84
МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У АПАРАТІ З ПНЕВМАТИЧНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ	
Данилюк О. М., Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.	89
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УВАРЮВАННЯ СОКУ ТА ЙОГО ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	
Маяк О.А., Сардаров А.М., Костенко С.М., Гриценко О.Ю., Шершньов Г.Г.	94
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ БИОМАССЫ	
Сороковая Н.Н., Коринчук Д.Н.	99

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТА ЕКОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АДСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ГЕЛПОУСТАНОВОК	
Беляновська О.А., Пустовой Г. М., Суха І.В., Губинський М.В., Литовченко Р.Д., Сухий К.М.	106
ЗАСТОСУВАННЯ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ВИЛУЧЕННІ БІЛКІВ ЗІ СТІЧНИХ ВОД ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ	
Сабадаш В.В., Гумницький Я.М.	111
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ІЗ ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ	
Пазюк В.М.	116
ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСА ТЕПЛООБМЕНА СОЛНЕЧНОЇ УСТАНОВКИ	
Селихов Ю.А., Коцаренко В.А.	120
ВИКОРИСТАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБАВОК У ПРОЦЕСАХ КОМПОСТУВАННЯ ХАРЧОВОЇ СКЛАДОВОЇ ТВЕРДИХ МУНІЦИПАЛЬНИХ ВІДХОДІВ	
Крусір Г.В., Сагдєєва О.А., Чернишова О.О., Мадані М.М., Гаркович О.Л.	125
ПРО ЗБЕРЕЖЕННЯ ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ ТА ЗАОЩАДЖЕННЯ РЕСУРСІВ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ТОМАТІВ	
Гаврилов О.В.	131
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ РОБОТИ БАРАБАННОЇ СУШАРКИ КОМПЛЕКСУ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИЦІЙНОГО БІОПАЛИВА	
Коринчук Д. М., Снєжкін Ю.Ф., Бунецький В. О.	134
ТЕХНОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ УТИЛІЗАЦІЇ-МОДИФІКАЦІЇ ПОЛІМЕРНОЇ ТАРИ ТА ПАКУВАННЯ	
Бухкало С.І.	140
ЗАСТОСУВАННЯ СОЛЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ РІЗНОГО ТИПУ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННИХ КОМПЛЕКСІВ	
Ощипок І.М.	143

ІННОВАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ, ФАРМАЦЕВТИЧНИХ, ХІМІЧНИХ ТА ПАРФУМЕРНИХ ВИРОБНИЦТВ

АНАЛІЗ СИРОВИНИ, ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ХАРЧОВИХ ПОРОШКІВ	
Потапов В.О., Євлаш В.В., Педорич І.П.	149
ІНФРАЧЕРВОНЕ СУШІННЯ ЗЕРНОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВІБРОХВИЛЬОВИМ КОНВЕСРОМ. ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ	
Паламарчук І.П., Кюрчев С.В., Верхованцева В.О.	153
РАЦІОНАЛЬНЕ КОМПОНУВАННЯ ФАЗНИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ З МОДУЛЬНИМИ СЕПАРАЦІЙНИМИ ПРИСТРОЯМИ	